

Resum

En aquest projecte es realitza la comprovació d'un model de Dish-Stirling simulat al programa MATLAB Simulink® amb les dades d'un model real instal·lat a la ETSEIB.

La instal·lació és un producte de la companyia italiana INNOVA anomenat TRINUM i consta d'un sistema termodinàmic que utilitza un plat com un concentrador solar i un motor Stirling de pistó lliure per generar fins a 1 kWh d'electricitat i 3 kW de calor.

S'adapta la simulació obtinguda amb les característiques del model real de Dish-Stirling

Es comparen els resultats del model simulat i el model real i, a partir d'aquests, s'intenta millorar la simulació per tal que aportí dades el més properes possibles a la realitat tot estudiant les diferents etapes que componen aquesta instal·lació i optimitzant-les.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. INTRODUCCIÓ	5
2. INTRODUCCIÓ AL SISTEMA DISH-STIRLING	6
2.1. Energia solar tèrmica de concentració.....	6
2.1.1. Centrals de torre	7
2.1.2. Central de cilindre parabòlic (CCP) o parabolic through	7
2.1.3. Central de Fresnel	8
2.1.4. Central de disc parabòlic o Dish-Stirling.....	8
3. SISTEMA DISH-STIRLING REAL	10
3.1. Descripció del sistema	10
3.2. Característiques pilot	11
3.3. Esquemes del sistema.....	11
3.4. Circuit solar o primari	13
3.4.1. Sistema Dish-Stirling.....	13
3.4.2. Acumulador (intercanviador de calor)	15
3.4.3. Fluid de refrigeració	16
3.5. Circuit Secundari.....	17
3.5.1. Circuit de bomba.....	17
3.5.2. Tanc d'expansió.....	17
3.5.3. Intercanviador extern	18
3.5.4. Mesurament d'energia	18
4. COMPARACIÓ DEL MODEL SIMULAT AMB EL MODEL REAL	19
4.1. Obtenció de dades del model real	19
4.1.1. Programari de monitorització TRINUM	19
4.1.2. Adquisició de dades ambientals.....	24
4.2. Preprocessament de dades.....	24
4.3. Processament de dades	27
4.3.1. Càlcul de la radiació solar	27
4.3.2. Càlcul d'energia, potència tèrmica i elèctrica	31
4.3.3. Resultats del model real.....	32
4.4. Obtenció de dades en la simulació	34
4.4.1. Resultats obtinguts	36

4.5. Aproximació del model real	40
5. ADAPTACIÓ I MILLORA DE LA SIMULACIÓ	44
5.1. Pèrdues en el motor Stirling	45
5.1.1. Pèrdues d'energia degudes a conducció interna	45
5.1.2. Pèrdues per conducció externa.....	45
5.1.3. Pèrdues de calor associades al desplaçament de l'èmbol	46
5.1.4. Introducció i simulació de les pèrdues.....	47
5.1.5. Resultats amb les noves pèrdues	49
5.2. Velocitat vent	51
5.3. Temperatura ambient	54
5.4. Irradiància.....	57
CONCLUSIONS	61
AGRAÏMENTS	63
BIBLIOGRAFIA	64
A SEGUIMENT SOLAR	67
B PRESSUPOST	70
C IMPACTE AMBIENTAL	74

1. Introducció

Durant els últims anys el consum d'energia ha crescut de forma exponencial a causa de múltiples factors relacionats que han generat una crisi energètica global. Per a intentar millorar aquesta situació les energies renovables han de jugar un paper molt destacat, ja que no emeten gasos d'efecte hivernacle ni s'esgoten.

Gràcies als avenços tecnològics i rendiments d'escala en la producció les energies renovables cada vegada tenen més pes en la producció energètica global. Dins de les energies renovables de la generació termosolar concentrada, el sistema de disc Dish-Stirling obté rendiments que poden arribar al 30%, estant el seu valor promig per sobre del 20%. A més, es poden aconseguir relacions de concentració superiors a 3000, el que permet arribar a temperatures entre 650 i 800°C i eficiències nominals en els motors Stirling entre el 30-40%, el que podria convertir al sistema Dish-Stirling en un dels models amb més èxit en el futur si aconsegueix abaratir els seus costos de producció.

Així doncs, els principals objectius per a aquest projecte són:

- Estudi del sistema Dish-Stirling instal·lat a l'ETSEIB, UPC, Barcelona. Recull de dades i càlcul de rendiments, potències, energies i altres característiques.
- Comparació de les dades obtingudes amb una simulació d'un disc de les mateixes característiques simulat mitjançant MATLAB Simulink®. Anàlisi de resultats.
- Estudi de les millores possibles en la simulació i comprovacions d'aquestes. Anàlisi de resultats.

2. Introducció al sistema Dish-Stirling

2.1. Energia solar tèrmica de concentració

L'Energia solar tèrmica de concentració es l'energia renovable en la qual es basa el sistema Dish-Stirling. Es pot anomenar, també, com a energia termoelèctrica i CSP (de l'anglès concentrated solar power).

Es la tecnologia que utilitza el calor del Sol per a generar electricitat. El calor generat per la concentració de la radiació solar directa s'envia a una unitat de conversió de potència, generalment un motor acoblat a un generador elèctric, per produir energia elèctrica.

Aquest procés es du a terme en les anomenades centrals solars termoelèctriques o centrals termosolars que es van començar a construir a Europa i Japó a principi dels 80. Les avantatges d'aquesta font d'energia es que es neta, abundant i renovable: cada deu dies la Terra rep una energia del Sol que equival a totes les reserves conegudes de petroli, gas i carbó.

Actualment conviuen diversos tipus de centrals solars termoelèctriques. Espanya està excel·lentment posicionada en aquest sector, ja que compta amb diverses plantes termosolars i un potent sector industrial que participa en projectes en tot el món.

El funcionament d'una planta termosolar es similar al d'una central tèrmica, però en comptes de carbó o gas utilitza l'energia del sol. Els raigs solars es concentren mitjançant miralls en un receptor que assoleix temperatures de fins 1000 °C. Aquest calor s'utilitza per a escalfar un fluid i generar vapor, que mou una turbina i produeix electricitat gràcies a un generador. Encara que les primeres centrals només podien operar durant hores de irradiació solar, avui dia es possible emmagatzemar el calor per a produir de nit. També es poden utilitzar directament per a augmentar la eficiència de cèl·lules fotovoltaiques.

Els principis bàsics de l'energia termosolar van ser definits per Augustin Mouchot al 1878 i en els anys 80 varies experiències van demostrar la seva viabilitat. No obstant això, fins fa poc aquest tipus d'energia es va veure frenada per tres factors:

- L'elevat cost dels materials, que s'ha començat a reduir a mesura que s'ha desenvolupat la tecnologia i augmentat el volum de producció.
- La impossibilitat d'emmagatzemar l'energia per a produir per la nit. Aquesta limitació s'ha començat a superar recentment mitjançant mesures que conserven el calor. Per exemple, la planta de Gemasolar a Sevilla utilitza sals foses per a emmagatzemar

el calor, fet pel qual es va convertir en la primera central termosolar capaç de subministrar energia 24 hores consecutives.

- La necessitat d'una gran irradiació solar durant tot l'any, fet que limitava la implantació d'aquesta energia a les regions més meridionals. No obstant això, projectes ambiciosos com Desertec proposen instal·lar les plantes en zones com el desert del Sàhara i després transportar l'electricitat a Europa.

El mercat de la tecnologia termosolar està determinat per la radiació solar directa (DNI per les seves sigles en anglès), que es aquella que arriba directament del sol a la superfície terrestre, sense interferències de partícules, núvols o altres elements. Els països amb una major capacitat instal·lada d'aquesta tecnologia són Estats Units i Espanya. Actualment es desenvolupen nombrosos projectes termosolars a països com Marroc, Estats Units o Austràlia. Molts d'ells compten amb participació espanyola.

Els principals sistemes termosolars són les centrals de torre central, les de cilindre parabòlic, les de Fresnel lineals i les de disc parabòlic. A més existeixen altres d'experimentals amb prototips com la torre solar de convecció.

2.1.1. Centrals de torre

Utilitza un conjunt de miralls plans orientables (denominats heliòstats) que concentren els raigs solars en un receptor situat en el punt més alt d'una torre la qual envolten. Utilitzen vapor o nitrats en forma de sals fosses, encara que arriben a una temperatura més alta que en els cilindres parabòlics. Es una tecnologia provada, eficaç i rentable a mig termini. Les primeres central experimentals d'aquest tipus es van construir a Almeria (Espanya) i Nio (Japó) al 1981. El repte actual passa per reduir els costos de construcció de les plantes termosolars de torre.

Empreses com Torresol Energy, Ahora solar, SENER i BrightSource Energy treballen amb plantes de torre central.

2.1.2. Central de cilindre parabòlic (CCP) o parabolic through

Aquest tipus de plantes són les més prometedores des del punt de vista comercial i són la tecnologia termosolar més madura. Utilitzen miralls en forma de cilindres parabòlics per l'eix dels quals discorre una canonada on es concentren els raigs del sol. La canonada conté un fluid que s'escalfa i genera vapor que mou una turbina. Aquest fluid acostuma a ser vapor o, en plantes més modernes, nitrats en forma de sal fossa que transporta l'energia tèrmica absorbida al generador o al magatzem tèrmic calent. D'altre banda, les sals necessiten una temperatura mínima relativament alta pel funcionament correcte de la planta. Estan operatives centrals solars cilindro-parabòliques a Espanya i altres països.

Empreses com Abengoa, Acciona o SkyFuel treballen les plantes CCP.

2.1.3. Central de Fresnel

Aquestes plantes són similars a les de cilindre parabòlic amb la diferència que s'utilitzen miralls plans per concentrar la radiació. Es basen en l'ús de la llei de refracció per a concentrar la llum solar, normalment mitjançant la utilització de lents de Fresnel que s'orienten en dos eixos. Aquestes lents, producte d'aproximar una lent equivalent a trossos rectes, són un conjunt de prismes de geometria radial amb focus comú capaços de concentrar la llum de la mateixa manera que una sola lent però a una fracció del seu pes.

Les centrals Fresnel presenten l'avantatge d'un menor volum i pes estructural dels concentradors així com l'obertura focal variable, però requereixen un sistema de control més avançat. Algunes empreses que treballen aquesta tecnologia són Novatec Solar i AREVA.

2.1.4. Central de disc parabòlic o Dish-Stirling

Aquesta classe de central termosolar, utilitza un mirall en forma de disc parabòlic per a concentrar la radiació solar en la cavitat d'un receptor, dins del qual es absorbeix i transferida al focus calent d'un motor Stirling, per això també s'anomena central de disc-Stirling. El calor acumulat eleva la temperatura del fluid que conté el motor Stirling fet que l'acciona i mou una turbina que genera electricitat. Els motors Stirling són escollits per la seva alta eficiència, llarga duració i baix manteniment ja que són motors de combustió externa. La planta de disc parabòlic més coneguda es la de Mojave (Estats Units).

Tot i que la capacitat individual oscil·la entre 1 kW i 50 kW, els sistemes Dish-Stirling són modulars, i permeten fer plantes de major capacitat. Han funcionat per aplicacions aïllades de producció elèctrica i per connexió a xarxa.

Els discos parabòlics han evolucionat tant als EUA com a Europa cap a la construcció d'unitats autònomes connectades a motors Stirling situats al focus. Els sistemes disc-Stirling han demostrat la major eficiència de conversió de radiació solar en energia elèctrica amb valors màxims del 30% i fins a un 25% de mitjana diària en unitats de 7 a 25kW. A causa de la curvatura parabòlica del concentrador i a la baixa relació distància focal / diàmetre ($f / D = 0,6$), es poden aconseguir altes relacions de concentració per sobre de 3.000. Això permet arribar a temperatures molt altes d'operació (entre 650 i 800 °C), donant lloc a eficiències en el motor Stirling de l'ordre del 30 al 40%. La superfície còncava del concentrador està coberta per miralls de vidre de segona superfície amb la seva corresponent curvatura parabòlica o bé per miralls prims o polímers metal·litzats de primera superfície suportats sobre una estructura de fibra de vidre o de membrana tensionada. Els receptors per a

sistemes disc / Stirling són de tipus cavitat, amb una petita obertura i el seu corresponent sistema d'aïllament.

El primer prototip comercial de Dish-Stirling va ser el sistema Vanguard, de Advanco, produït en 1984, amb una producció de 25 kW i una eficiència de solar a elèctrica de fins el 29,4%. L'empresa italiana Innova té al mercat el sistema Trinum que ofereix un sistema de cogeneració, aprofitant la necessitat de refredar el focus fred del motor, i produeix 1 kW elèctric i 3 kW tèrmics (és aquest sistema justament el que està instal·lat a l'ETSEIB i que serà objecte d'estudi).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.1. Sistemes CSP

(a) Receptor de torre central, (b) Cilindre parabòlic, (c) Fresnel lineal, (d) Disc-Stirling

3. Sistema Dish-Stirling Real

En aquest apartat es descriu el sistema Dish-Stirling real instal·lat a l'ETSEIB amb les característiques i propietats facilitades pel fabricant.

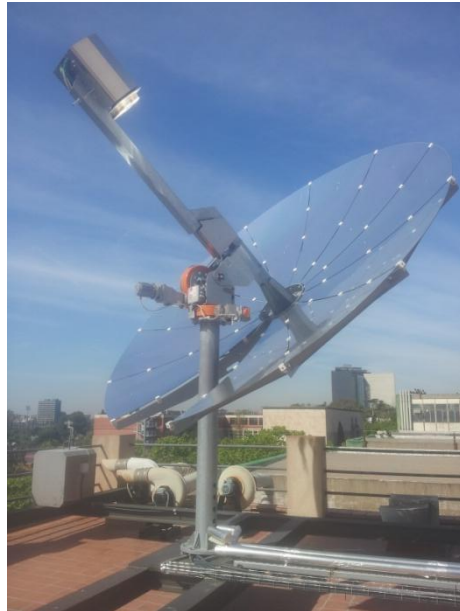


Figura 3.1. Model Dish-Stirling instal·lat a l'ETSEIB. Fotografia de l'autor.

3.1. Descripció del sistema

La instal·lació consta d'un sistema termodinàmic que utilitza un plat com un concentrador solar i un motor Stirling de pistó lliure per generar fins a 1 kWh d'electricitat i 3 kW de calor. El sistema produeix energia que es pot utilitzar de forma instantània i l'energia tèrmica que es pot acumular i utilitzar en qualsevol moment durant el dia a causa de la utilització d'un acumulador de calor.

La temperatura màxima de l'aigua com en termes de funcionament del motor és de 70 °C, mentre que el límit establert quan el sistema està funcionant és de 60 °C. Per tant, la producció d'energia tèrmica és principalment per a ús sanitari i calefacció a través de sistemes de baixa temperatura. Són possibles diferents tipus d'aplicacions amb la integració dels sistemes convencionals, com ara plantes industrials, piscines, gimnasos, edificis públics, etc.

El disc Stirling es descriu en aquest document és un producte de INNOVA anomenat TRINUM. TRINUM està en conformitat amb la Directiva de la UE 2009/28. El sistema es compon d'un concentrador solar que té un plat de diàmetre 3,75m que segueix el sol en

dos eixos (azimut i elevació) i s'enfoca els raigs del sol directament al cap del motor Stirling. La calor generada es transforma en energia tèrmica i elèctrica que pot ser subministrada a la xarxa sense necessitat d'un inversor.

L'eficiència global de conversió del sistema és 55,2%, compost per un rendiments tèrmics 13,8% i 41,4% elèctrics (dades teòriques).

3.2. Característiques pilot

El pilot s'instal·la en un edifici UPC, que és també un edifici públic. Per aquestes raons algunes restriccions addicionals s'han afegit al projecte.

L'energia elèctrica extreta del moviment Stirling s'injecta a la xarxa de l'edifici.

La producció d'aigua calenta s'utilitza per preescalfar l'aigua d'un gimnàs emplaçat en el mateix edifici. El gimnàs es col·loca en el costat ombrejat de l'edifici, per això hi ha una gran distància entre el concentrador de plat parabòlic i el consum tèrmic.

A la instal·lació, es van utilitzar 3 circuits diferents: un circuit solar, un circuit secundari tancat per al transport d'aigua calenta per al gimnàs i un circuit terciari per a l'aigua del gimnàs

Per tal de prevenir la legionel·la, hi ha un escalfament final fent servir una caldera per prendre la temperatura de l'aigua per sobre de 70 ° C.

3.3. Esquemes del sistema

A la Figura 3.2. es pot veure el disseny i mesuraments del col·lector de plat parabòlic. A la Figura 3.3., es veu l'esquema elèctric i hidràulic de la instal·lació pilot.

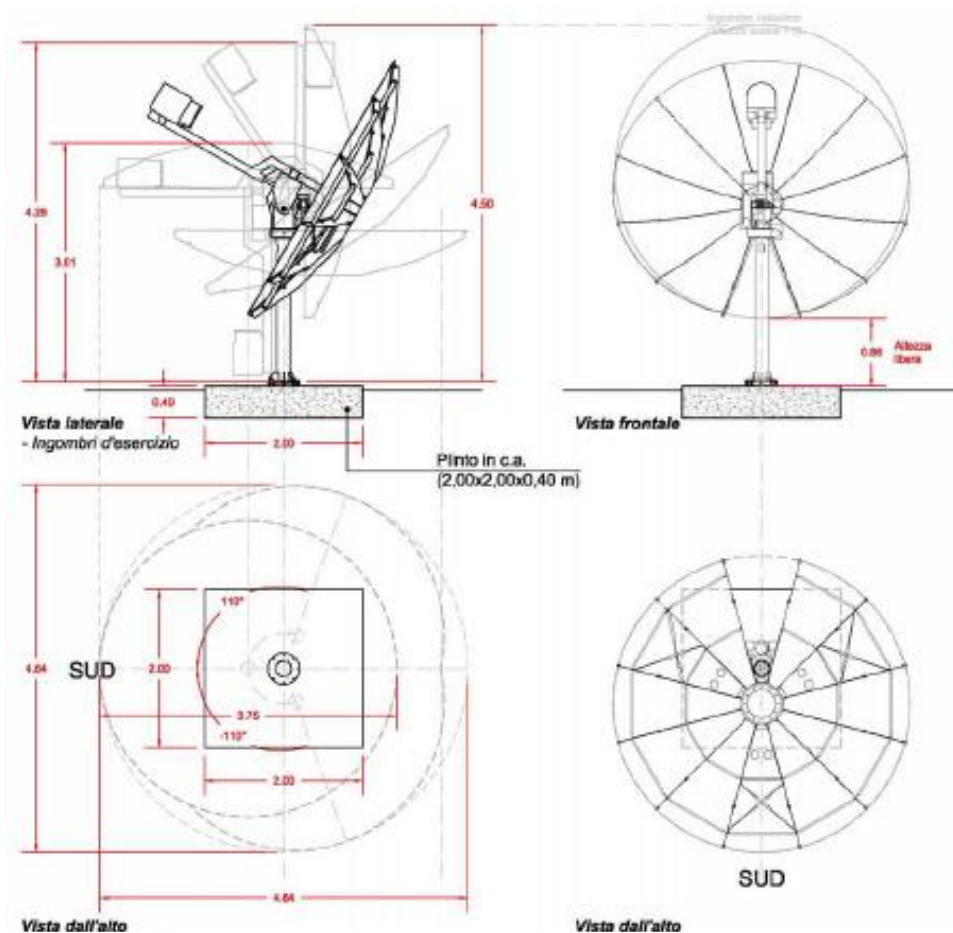


Figura 3.2. Esquema del col·lector

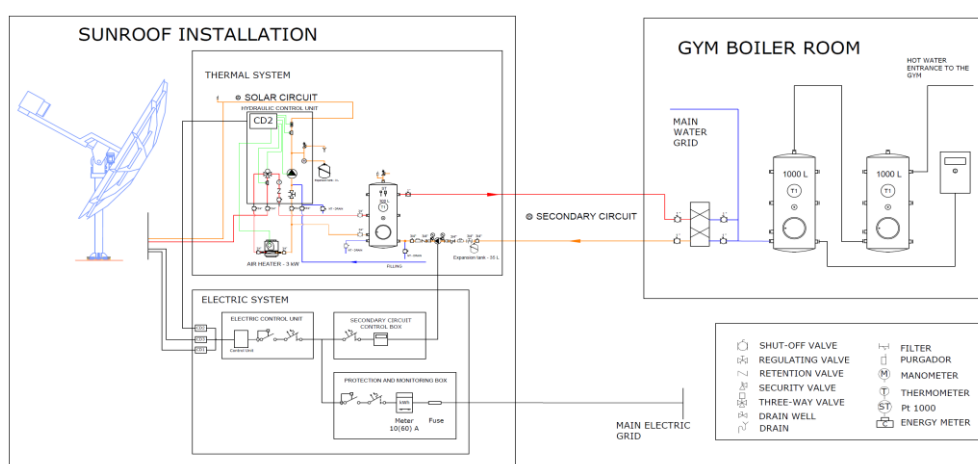


Figura 3.3. Esquema elèctric i hidràulic de la instal·lació pilot

3.4. Circuit solar o primari

3.4.1. Sistema Dish-Stirling

El propòsit del TRINIUM Dish-Stirling és convertir la radiació solar en energia tèrmica i elèctrica, aquest sistema es divideix en les següents parts:

- Òptica: 1 concentrador parabòlic fet d'alumini 11 làmines múltiples 90% parts reflectants. L'àrea reflectant total neta és 9,58 m².
- Motor Stirling: el sistema està equipat amb un motor de pistó lliure Stirling lineal amb una potència elèctrica d'1 kW de potència produïda pel MEC, Microgen Motor Corporation.
- Seguiment solar: un sistema d'unitat de moviment de dos eixos i un sistema de seguiment està a càrrec d'enfocar el concentrador al sol.
- Estructura: una estructura d'acer galvanitzat i acer forma l'estructura del sistema, que inclou un suport per a l'òptica, un suport focal per al motor Stirling i un suport de tronc. Dins d'aquesta estructura, es connectaran tots els circuits hidràulics i elèctrics relacionats amb el senyal i l'alimentació. L'estructura està proveïda d'unitats de connexió per tal que sigui més fàcil d'instal·lar i mantenir el dispositiu. El circuit hidràulic està equipat amb una vàlvula d'aire.
- Sensors ambientals: el sistema està equipat amb un sensor de pluja i un anemòmetre per mesurar la velocitat del vent.
- Unitat de control elèctric (ECU): inclou tota l'electrònica, el control i la interfície d'usuari i la pantalla. Inclou el tauler de control del motor Stirling, la Junta de Protecció de la xarxa, i el tauler de control principal. La placa de control s'encarrega de mantenir el sistema en funcionament adequat. També està connectat als sensors ambientals i el control de Stirling, i realitza un seguiment del sol amb un conjunt algoritme en el rellotge astronòmic i les coordenades GPS.
- Unitat de control hidràulic (HCU): aquesta unitat controla la distribució hidràulica i inclou:
 - Unitat de control hidràulic: permet la gestió de l'energia tèrmica produïda i que el sistema funcioni a mode de seguretat. El quadre de distribució té la bomba hidràulica, mesurador de flux, sensors de temperatura i una vàlvula de motor de tres vies.
 - Escalfador d'aire: Permet posar el circuit en mode de seguretat, quan el sistema arriba qualsevol temperatura per sobre dels límits; la HCU commuta el flux de refrigerant des de l'acumulador a l'escalfador d'aire, el que permet la dissipació de l'energia tèrmica a l'aire.

- Tanc d'expansió: Es permet l'expansió i compressió del fluid refrigerant. És un dipòsit d'expansió de 5 l, amb una temperatura màxima de 99°C i una pressió màxima de 8 bar.
- Bomba: Una cria de baixa potència s'utilitza per augmentar la caiguda de pressió en el sistema primari per augmentar el flux d'aigua (veure Figura 3.4.)
- Vàlvula de tres vies: Aquesta vàlvula és utilitzada pel sistema de control per canviar el flux entre el circuit primari, en condicions normals, i el circuit de l'escalfador d'aire, en cas d'un sobreescalfament.
- Els sensors de flux i temperatura: Amb aquests elements es mesuren les mesures de la temperatura i la velocitat de flux per permetre que el sistema de control prengui decisions.

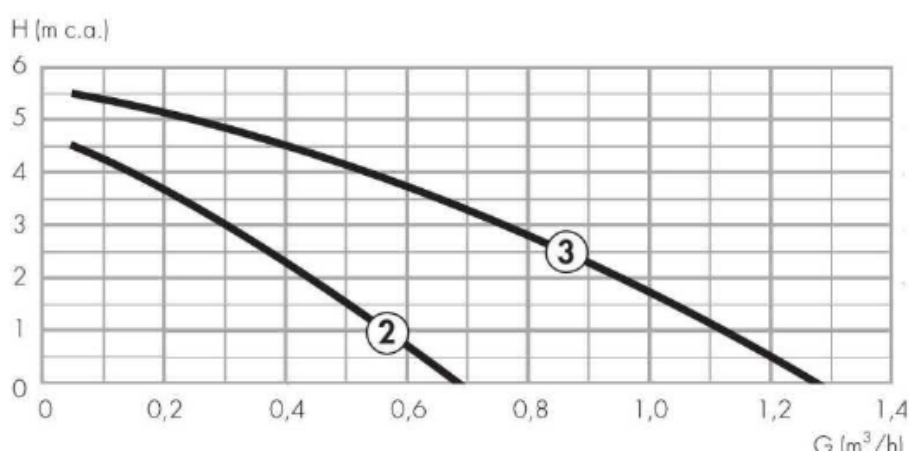


Figura 3.4. Diagrama del sistema hidràulic del circuit solar.

La capacitat del circuit solar ha de ser entre 7 i 19 L / min.

Totes les connexions hidràuliques entre la HCU i el concentrador i entre gabinet hidràulic i la caldera han de ser considerades en el càlcul de la taxa de flux.

Una bomba addicional en el circuit solar s'ha de proporcionar quan els components hidràulics o circuits introdueixen pèrdues de càrrega excessives. En aquest sentit, si el circuit de canonada entre la HCU i l'acumulador és més llarg que 20 m, una bomba addicional s'ha d'instal·lar en sèrie amb la bomba que es proporciona amb la HCU.

Les característiques principals del sistema de disc Stirling es poden veure a la Taula 3.1.

Característica	Valor	Unitats
Potència tèrmica de sortida	3	kW
Potència elèctrica de sortida	1	kW

Operació		
Producció d'aigua calenta amb ΔT 30 °C	80	l/h
Producció d'aigua calenta amb ΔT 40 °C	70	l/h
Producció d'aigua calenta amb ΔT 50 °C	60	l/h
Potència elèctrica amb DNI=750 W/m ²	1,00	kW
Potència elèctrica amb DNI=650 W/m ²	0,65	kW
Potència elèctrica amb DNI=600 W/m ²	0,30	kW
Regulació d'aigua escalfada	6 to 60	°C
Cabal del refrigerant	7 to 19	l/min
Pressió de treball màxima	6	bar
Condicions ambientals		
Vent màxim durant l'operativitat	50	Km/h
Vent màxim durant posició segura	150	Km/h
Temperatura d'operació mínima	-10	°C
Subministrament elèctric		
Pic de consum elèctric	400	W
Alimentació de tensió	230	V AC
Freqüència	50 +/- 0,5	Hz
Dimensions		
Diàmetre reflector	3750	mm
Àrea d'operació	D 5000 x H 4600	mm
Superfície reflectant bruta	11,23	m ²
Superfície reflectant neta	9,58	m ²
Pes	600	Kg
Alçada en la posició de tancament	3000	mm

Taula 3.1. Característiques principals del sistema de disc Stirling

3.4.2. Acumulador (intercanviador de calor)

L'acumulador és el BSV300; és un acumulador d'alta eficiència amb la bobina fixa, és particularment òptim per una instal·lació residencial civil per produir aigua calenta sanitària. L'intercanviador de calor interior és del tipus mono-tub.

L'acumulador té una pressió màxima permesa de 10 bars; i la temperatura màxima és de 95°C. L'intercanviador de calor té una superfície d'intercanvi d'1,05 m², una pressió màxima de 12 bars i una temperatura màxima de 110°C. El material aïllant és poliuretà amb una amplada de 50 mm. A la Figura 3.5



Figura 3.5. Acumulador. Foto de l'autor

3.4.3. Fluid de refrigeració

La calor del motor Stirling s'elimina a través d'un fluid que és principalment aigua amb *Propilenglicol*. Aquest additiu s'utilitza com un fluid anticongelant, i que es tria per la seva capacitat per barrejar-se amb aigua, les seves proporcions baixes necessàries a la baixa de manera significativa el punt de congelació i per la seva toxicitat gairebé nul·la, un problema important en la majoria d'anticongelants fluids. El cabal del fluid refrigerant és d'aproximadament 15 l / min a l'interior del sistema de refrigeració i la temperatura del fluid de refredament ha de ser entre 6 i 60 °C. Per exemple, si la proporció de 10 parts d'aigua per una part d'anticongelant, el fluid de refrigeració pot reduir el punt de congelació a -3 ° C. L'elecció sobre la quantitat de propilenglicol ha de ser barrejat amb aigua dependrà de la ubicació exacta del sistema, i normalment es pren tenint en compte la temperatura històrica mínima del lloc. Per exemple, a Barcelona que seria necessari utilitzar una barreja amb al voltant del 29% de glicol de propilè, de manera que la temperatura històricament mínim registrat a Barcelona és -10°C. Com a referència, el següent gràfic mostra les proporcions necessàries de propilenglicol per aconseguir alguns dels diferents punts de congelació.

Propilenglicol en solució [%]	Temperatura en el punt de congelació [°C]	Temperatura en el punt d'ebullició [°C]
0	0	100
10	-3	100
20	-8	101

30	-14	102
40	-22	104
50	-34	106
60	-48	108

Taula 3.2. Punts de congelació i d'ebullició de la solució d'aigua

3.5. Circuit Secundari

3.5.1. Circuit de bomba

La bomba fa que flueixi l'aigua del circuit secundari; aquesta bomba està instal·lada a la canonada d'aigua freda.

Aquesta bomba té un baix consum d'energia, un baix nivell de soroll i una llarga vida útil sense manteniment.



Figura 3.6. Circuit de bomba secundari

El rang de temperatura del líquid és de -10 a $+110$ °C, el rang de temperatura ambient és de 0 a 40 °C, la pressió màxima és de 10 bar, i té una potència màxima de 150 W.

Abans i després de la bomba s'instal·len dues vàlvules per permetre el reemplaçament i per permetre qualsevol tipus de manteniment que s'hagi de fer. Abans de la bomba s'ha d'instal·lar un filtre i després de la bomba s'ha d'instal·lar una vàlvula de retenció. També s'instal·la un bypass per mesurar la caiguda de pressió.

3.5.2. Tanc d'expansió

El tanc d'expansió circuit secundari permet l'expansió i la compressió del fluid del circuit secundari, es recomana per instal·lar-ho en l'acumulador abans de la bomba per permetre les accions en el circuit secundari sense desconnectar el dipòsit d'expansió.

En la instal·lació pilot s'ha utilitzat un vas d'expansió 35 l.

3.5.3. Intercanviador extern

S'ha d'instal·lar un intercanviador de calor per extreure l'energia tèrmica del circuit secundari al circuit terciari.

En la Taula 3.3. es tenen les característiques del intercambiador instal·lat.

	Aigua	Aigua
Entrada/Sortida	50/20 °C	12/17.5 °C
Cabal	1.020 l/h	5.500 l/h
Factor d'embrutiment	0.000005 m ² K/W	0.000005 m ² K/W
Pressió / màxima	3.000 / 6.000 HPa	3.000/6.000 Hpa
Temperatura	60 °C	35 °C

Taula 3.3. Característiques intercambiador

3.5.4. Mesurament d'energia

Per ser capaç de mesurar la potència intercanviada amb el circuit primari s'ha d'instal·lar un mesurador de potència, com el Multical 402 de la marca comercial Kamstrup que es compon de les següents parts:

- Multical 402: Aquest dispositiu s'encarrega de calcular l'energia tèrmica intercanviada entre els circuits que utilitzen els mesuraments dels sensors.
- Sensors de temperatura: Dos sensors de temperatura, un a l'entrada, i un a la sortida de l'intercanviador de calor.
- Cabalímetre: Un mesurador de flux per mesurar el cabal d'aigua en el circuit secundari, aquest mesurador de flux s'ha d'instal·lar a la canonada d'aigua freda.

4. Comparació del model simulat amb el model real

En aquest apartat s'extreuen unes dades del model Dish-Stirling real i es comparen amb les dades que s'obtenen en el model simulat amb unes condicions semblants.

4.1. Obtenció de dades del model real

4.1.1. Programari de monitorització TRINUM

Les dades s'han recollit a través del sistema de monitorització del mètode CHP Dish-Stirling, fabricat per INNOVA, que permet la descàrrega dels arxius de registre generats per la taula ECU.

Udicom Log Reader és un programari de supervisió desenvolupat per Udicom que proporciona un control remot del seu sistema de captació solar. Requereix comunicació de tipus RS-232 entre el PLC integrat i un ordinador personal utilitzat per control remot.

4.1.1.1. Arxius de dades i registre

El programari de monitorització Udicom Log Reader permet la descàrrega de les dades registrades a l'ordinador personal utilitzat mitjançant control remot, en un arxiu CSV (a la Taula 4.1. hi ha una descripció de les dades disponibles en aquest arxiu). Això s'aconsegueix seguint els següents passos:

- Sincronitzar lector del registre amb la targeta SD en el PLC utilitzant el botó amb el rellotge.
- Seleccionar els fitxers que es vulguin descarregar.
- Fer clic al botó amb el text "LOG".
- Guardar el document.

Els registres de dades obtingudes a l'arxiu CSV són cada 5 minuts. A la **Error! Reference source not found..** es pot veure la interfície del programari Udicom Log Reader.

4.1.1.2. Sol·licitar les dades a través de Modbus

El Sistema TRINIUM té la possibilitat de treballar com a servidor Modbus a través de comunicació RS232. Això permet a un client Modbus sol·licitar les dades desitjades al PLC. Per activar aquesta funció el paràmetre "RS232Debug" ha de ser 4. Aquesta funció és incompatible amb la sincronització mitjançant el Software Udicom Log Reader. La direcció

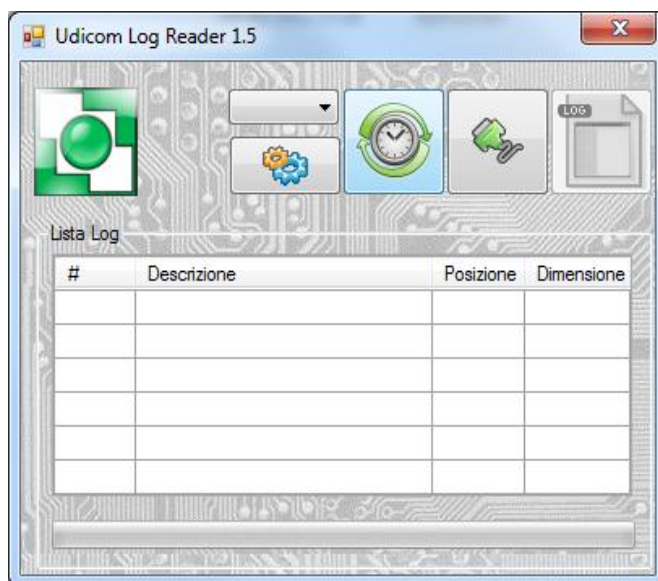


Figura 4.1. Interfície de Unicom Log Reader

ID	Descripció	Unitats	Instrument de mesura
1	Data i Temps	DD/MM/YYYY HH:MM	(PLC)
2	Energia TD	W	(PLC)
3	Velocitat vent	m/s	Anenòmetre
4	Punt d'ajust de cap	°C	(PLC)
5	Control de Temperatura	°C	Parell termoelèctric
6	Límit de Temperatura	°C	Parell termoelèctric
7	Temperatura entrada líquid refrigerant	°C	Termistor
8	Temperatura sortida líquid refrigerant	°C	Termistor
9	Cabal de refrigerant	l/min	Cabalímetre
10	Temperatura Ambient	°C	Termistor

11	Temperatura de caldera	°C	Termistor
12	Voltatge	V	(PLC)
13	Corrent	A	(PLC)
14	Potència Elèctrica	W	(PLC)
15	Freqüència	Hz	(PLC)
16	Angle de fase	°	(PLC)
17	Codi d'error	-	(PLC)
18	Azimut	°	(PLC)
19	Elevació	°	(PLC)
20	Automatització	-	(PLC)

Taula 4.1. Descripció de les dades a l'arxiu CSV

del dispositiu Modbus està configurat al "SerialID" Paràmetre. Aquesta comunicació s'ha de fer a través del port de sèrie "COM".

En la taula 4.2 s'explica com ha de ser la configuració d'aquesta comunicació i en la taula 4.3 es detallen les dades disponibles en el servidor Modbus.

Paràmetre	Valor
Velocitat de transmissió	19200
Bits	8
Paritat	Uniforme
Bít d'aturada	1

Taula 4.2. Configuració comunicació Modbus

Registre	Nom	Descripció	Accés
1	Indicador d'estat de Stirling	bit 0: Motor en marxa bit 1: Motor de bloqueig bit 2: Font de calor activada bit 3: Reset automàtic bit 4: Reset de Client bit 5: Reset de Servei bit 6 - 15: NC	Només lectura
2	Temperatura de consigna del cap [d°C]	Temperatura de consigna del cap del motor	Només lectura
3	Control de Temperatura del cap [d°C]	Temperatura de control del cap del motor	Només lectura
4	Límit de temperatura del cap [d°C]	Temperatura límit del cap del motor	Només lectura
5	Temperatura de sortida del refrigerant [d°C]	Temperatura de sortida del refrigerant	Només lectura
6	Temperatura ambient [d°C]	Temperatura ambient	Només lectura
7	Temperatura de la caldera [d°C]	Temperatura de la caldera	Només lectura
8	Cabal del refrigerant [dl / min]	Cabal del refrigerant	Només lectura
9	Voltatge [dV]	Tensió de xarxa	Només lectura
10	Corrent [cA]	Corrent de Stirling	Només lectura
11	Potència [W]	Potència de Stirling	Només lectura
12	Freqüència [cHz]	Freqüència de xarxa	Només lectura

13	Angle de fase [d°]	Angle de fase	Només lectura
14	Energia generada [kWh]	Energia generada	Només lectura
15	Codi d'error de Stirling	Codi d'error	Només lectura

Els 9 primers bits LSB identifiquen l'estat de la màquina

01 = OPERATIVA
 02 = SEGÜINT
 03 = SOTA_RESET_1
 04 = SOTA_RESET_2
 05 = POSICIONAMENT_DORMIR
 06= DORMENT
 07 = POSICIONAMENT_SEGUR
 08 = SEGUR
 09 = MANUAL
 0A = MANTENIMENT
 0B = ERR_ENC_AZIMUTH_BWD
 0C = ERR_ENC_AZIMUTH_FWD
 0D=ERR_ENC_ELEVATION_BWD
 0E=ERR_ENC_ELEVATION_FWD
 0F = ERR_FC_AZIMUTH_MIN
 10 = ERR_FC_AZIMUTH_MAX
 11 = ERR_FC_ELEVATION_MIN
 12 = ERR_FC_ELEVATION_MAX

16 Estat de l'automatització

Només lectura

- El bit 0x20 indica error per temperatura per sobre del màxim
- El bit 0x40 indica els problemes de moviment
- El bit 0x80 bit indica l'absència del HeatEnable
- El bit 0x100 indica la presència de pluja
- El bit 0x200 indica l'absència de

		tensió	
		- El bit 0x400 indica vent excessiu	
		- El bit 0x1000 indica anormalitat en UPS	
17	Estat pertorbació	0: Ok, 1: Anormalitat	Només lectura
18	Estat control a distància	0: Manual, 1 Control a distància	Gravable ¹
19	SetPoint potència	SetPoint potència	Gravable

Taula 4.3. Dades disponibles al servidor Modbus

4.1.2. Adquisició de dades ambientals

La irradiància solar global ha estat adquirida des de la pàgina web del *Servei Meteorològic de Catalunya*. L'estació meteorològica més propera disponible per a la instal·lació pilot és l'EMA Barcelona - Zona Universitària, situada al barri de Pedralbes de Barcelona (prop d'1 km entre el pilot i l'estació meteorològica).

D'aquesta estació s'han obtingut dades que han sigut útils per al posterior estudi, com són la irradiància solar global, la humitat relativa, la pressió atmosfèrica i la velocitat del vent. La irradiància global de dades s'adquireix cada 30 minuts i les unitats d'aquesta variable són W/m².

L'enllaç d'aquesta estació és: <http://www.meteo.cat/observacions/xema/dades?codi=X8>.

A la Figura 4.2. es pot veure la distància d'aquesta estació meteorològica al disc Dish-Stirling i en la Figura 4.3. (a-b) es veuen imatges de l'estació meteorològica.

4.2. Preprocessament de dades

En la instal·lació experimental es presenten dades anòmales en diversos dies a causa d'una varietat de raons, com ara condicions d'avís i alarma prolongats. Altres dies, falten dades pel fet que la instal·lació experimental no ha estat funcionant contínuament a causa d'operacions manuals, treballs de manteniment o que estava aturada. Per aquestes raons s'ha de tenir cura abans de triar les dades que s'utilitzaran en l'estudi i agafar només aquells dies en els que la instal·lació Dish-Stirling ha funcionat continuadament i sense donar errors ni dades incorrectes.

¹ Gravable només si l'Estat control a distància = 1



Figura 4.2. Distància entre Dish-Stirling i estació meteorològica



(a)



(b)

Figura 4.3. Imatges de l'estació meteorològica de Zona Universitària

Com a exemple de com s'analitzen i es supervisen els dies per veure sin son vàlids o no es té la Taula 4.4, que detalla el temps de treball, els diferents errors i el tipus d'informació que resulta per a cada dia. S'ha agafat el període que comprèn entre el 26/04/2015 fins el 2/05/2015 com a mode d'exemple.

Data	Temps de treball inicial	Temps de treball final	Hores treballant	Tipus d'error	Temps inicial d'error	Tipus de dades
26/04/2015	-	-		603	19:45:55	Dades anòmales

27/04/2015	09:50:57 14:50:57	12:10:57 17:30:58	02:20:00 02:40:01	603	19:45:58	Falten dades
28/04/2015	08:11:00	18:31:01	10:20:01	603	19:51:01	Dades seleccionades
29/04/2015	14:21:03	19:51:04	05:30:01	603	19:56:04	Falten dades
30/04/2015	10:26:06	19:01:07	08:35:01	603	19:51:07	Falten dades
01/05/2015	17:01:09	19:41:10	02:40:01	407	19:56:10	Falten dades
02/05/2015	-	-		407	00:00:00	Dades anòmales

Taula 4.4. Informació de dies estudiats

Els errors més comuns que eviten el funcionament correcte del sistema són:

- 407: Error de control de termoparell.
- 603: baixa taxa de flux del líquid refrigerant.

Com es pot apreciar a la Taula 4.4 es poden tenir dades anòmales (que son degudes principalment a que el sistema no ha funcionat aquell dia) i dies que falten dades (normalment quan el sistema ha deixat de funcionar durant un temps durant el dia). Per últim tenim els dies que són seleccionables per a l'estudi com es el cas del dia 28/04/2015 que, com es pot observar, es un dia que el sistema ha treballat continuadament durant més de 10 hores.

Per a aquest treball es disposa de dos períodes d'estudi, el primer va des del 20/04/2015 fins el 28/05/2015 i el segon va de del 14/04/2016 fins al 05/05/2016. En la Taula 4.5. es poden veure els dies amb dades vàlides per fer l'estudi dintre d'aquests dos períodes.

Data	Temps de treball inicial	Temps de treball final	Hores treballant	Tipus d'error	Temps inicial d'error
21/04/2015	08:20:39	19:40:40	11:20:01	603	19:45:40

23/04/2015	08:20:45	19:00:46	10:40:01	603	19:45:46
28/04/2015	08:11:00	18:31:01	10:20:01	603	19:51:01
22/05/2015	07:48:18	20:13:19	12:25:01	603	20:18:19
23/05/2015	07:48:21	19:08:22	11:20:01	603	20:08:22
16/04/2016	08:23:17	18:28:18	10:05:01	603	19:38:18
18/04/2016	08:38:23	19:28:24	10:50:01	603	19:38:24
23/04/2016	08:13:37	17:53:39	09:40:02	603	18:48:39
24/04/2016	08:13:40	19:18:42	11:05:02	603	19:43:42
01/05/2016	08:04:00	19:54:01	11:50:01	603	19:59:01
02/05/2016	08:04:03	19:54:04	11:50:01	603	19:59:04
03/05/2016	08:04:06	19:44:07	11:40:01	603	19:54:07
04/05/2016	07:59:09	19:54:10	11:55:01	603	19:59:10

Taula 4.5. Dies amb dades vàlides

Es tenen disponibles per fer l'estudi 5 dies del 2015 i 8 dies del 2016, tots ells pertanyents als mesos d'abril i maig. Per a la comparativa amb la simulació s'han agafat els 5 dies de 2015 i 5 dies més del 2016, descartant, per tant, 3 dies del 2016 agafats al atzar (els assenyalats en vermell a la Taula 4.5). Això es fa per tenir els mateixos dies de 2015 i 2016 per a l'estudi i per què es consideren suficients dades per a la comparació posterior.

4.3. Processament de dades

4.3.1. Càlcul de la radiació solar

Gràcies a l'estació meteorològica esmentada a l'apartat 4.1.2. s'han pogut recopilar dades de radiació global solar¹ dels diferents dies objecte d'estudi. La radiació global es defineix

¹ La *radiació solar global* s'entén com aquella que engloba la radiació directa i difusa.

com la radiació solar rebuda d'un angle sòlid de 2π estereoradiants¹ sobre una superfície horitzontal. La radiació global inclou la rebuda directament del disc solar (component directa H_{dir}) i també la radiació celeste difusa dispersada al travessar l'atmosfera (component difusa H_{dif}).

L'estació meteorològica utilitza un piranòmetre termoelèctric per a realitzar les mesures de radiació global solar. La majoria del piranòmetres es basen en la mesura de la diferencia de temperatures entre dos superfícies, una blanca i una altre negra, tancades en una cambra semiesfèrica de vidre. El seu funcionament depèn del potencial generat entre aquestes dos superfícies al escalfar-se de forma desigual a causa de la radiació solar incident, el que permet establir una relació entre voltatge i radiació solar i així deduir el seu valor. Es col·loca en el pla horitzontal a dos metres del terra en l'estació considerada. En la Figura 4.4. tenim un exemple d'un piranòmetre.



Figura 4.4. Exemple de piranòmetre

Ja que les dades obtingudes corresponen a radiació global sobre una superfície horitzontal, es necessària una forma d'extreure la radiació directa solar, ja que és aquest el valor de radiació útil per al funcionament del Dish-Stirling. Per a això s'ha de poder separar els components difús i directe de la radiació incident i el valor total de radiació amb angle d'incidència nul respecte al Sol per a qualsevol moment del dia.

Per a dur a terme això, s'ha utilitzat el mètode de *Perrin de Brichambaut et Dogniaux* per dies clars. Aquest mètode permet la descomposició de la radiació solar global mitjançant l'ús de dades atmosfèriques i la posició del sol al cel.

Si es descompon la radiació global H_o sobre una superfície horitzontal extraterrestre en directa H_{dir} i difusa H_{dif} :

¹ Si l'àrea d'una porció d'una esfera de radi r es r^2 , un *estereoradiant* es l'angle sòlid comprès entre aquesta porció i el centre de l'esfera.

$$H_0 = H_{dir} + H_{dif} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

llavors

$$H_{dir} = H_0 \exp \left(-\frac{T}{7,5} \cos(\varphi - \delta)^{-0,75} \right) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$H_{dif} = H_0 \frac{T}{31,6} [\cos(\varphi - \delta)]^{-0,5} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

On δ és la declinació solar, φ la latitud local (veure Annex A) i T adquireix un valor de:

$$T = 2,5 + 14,8B + 0,4(1 + 2B) \log(W \sin \alpha_s) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

On B és el *coeficient de pertorbació de Angström*. Aquest coeficient és un indicatiu de la quantitat d'aerosol en la vertical. Per tal de garantir una estimació més precisa, es van utilitzar 5 anys de dades de AERONET per calcular el paràmetre, que estableix les variacions estacionals i produeix un valor mitjà raonablement exacte per als mesos estudiats. El seu valor per a l'abril és 0,1613 i al maig és 0,14141 (els dos mesos dels quals es tenen dades per fer els càlculs d'aquest projecte).

El paràmetre W es defineix com l'espessor de l'aigua condensable a l'atmosfera i es pot calcular segons:

$$W = 2H_a \quad (\text{Ec. 4.5})$$

on H_a és la humitat absoluta (gr. aigua / m³ aire). Desafortunadament les dades de l'estació meteorològica no inclouen aquesta dada, es per això que s'han hagut de realitzar càlculs addicionals per treballar amb les dades que sí estan disponibles:

- Temperatura mitjana durant un període.
- Humitat relativa mitjana durant un període.
- Pressió atmosfèrica mitjana durant un període.

Coneixent les relacions existents entre aquests:

$$H_a = \frac{0,662 P_v}{P} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$H_r = \frac{P_V}{P_{SAT}} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

On P_V és la pressió parcial del vapor d'aigua en l'aire, P és la pressió atmosfèrica total, H_r és la humitat relativa i P_{SAT} és la pressió de saturació del vapor d'aigua a la temperatura a la qual es troba en el moment de la lectura.

És necessari calcular P_{SAT} , per a això s'ha fet servir la següent fórmula per a una aproximació fiable:

$$\ln\left(\frac{P_{SAT}}{P_C}\right) = \frac{T_C}{T} (a_1 v + a_2 v^{1,5} + a_3 v^3 + a_4 v^{3,5} + a_5 v^4 + a_6 v^{7,5}) \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$v = 1 - \frac{T}{T_C} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

On T_C i P_C són la temperatura i la pressió del punt crític de l'aigua respectivament, i a_i són coeficients. Els valors d'aquests paràmetres són:

- $T_C = 647,096 \text{ K}$
- $P_C = 22,064 \text{ MPa}$
- $a_1 = -7,85951783$
- $a_2 = 1,84408259$
- $a_3 = -11,7866497$
- $a_4 = 22,6807411$
- $a_5 = -15,9618719$
- $a_6 = 1,80122502$

Així doncs, el càlcul del paràmetre W es pot realitzar amb les dades disponibles i el càlcul de P_{SAT} segons:

$$W = 2 \frac{0,622}{P} H_r P_{SAT} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Finalment, $\overline{\sin \alpha_S}$ es calcula segons:

$$\overline{\sin \alpha_S} = \cos \phi \cos \delta \frac{\sin \omega - \frac{\pi}{180} \omega \cos \omega}{\frac{\pi}{180} \omega} \quad (\text{Ec. 4.11})$$

On ω és l'angle horari (veure Annex A).

Aquest mètode constitueix una bona aproximació per a les mitjanes mensuals o, fins i tot, diàries on no hi ha disponible informació sobre la radiació. No obstant això, gràcies a les dades de l'estació meteorològica es té accés a la informació global de radiació, per la qual cosa es poden fer uns càlculs addicionals per tal d'obtenir dades més precises.

Partint de la radiació solar extraterrestre sobre un pla horitzontal, calculat amb la constant solar, $I_0 = 1353 \text{ W m}^{-2}$ i la posició del sol al firmament per un instant determinat:

$$H_0 = I_0 \sin(\alpha_s) \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Ara es calcula el percentatge corresponent d'aquest valor per els components de radiació directa i difusa i, finalment, s'aplica aquest percentatge a la radiació global registrada per l'estació meteorològica R_{MED} , obtenint R_{Dir} i R_{Dif} com a valors finals de radiació directa i difusa respectivament. Així doncs:

$$R_{Dir} = \frac{H_{dir}}{H_{dir} + H_{dif}} R_{MED} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

$$R_{Dif} = \frac{H_{dif}}{H_{dir} + H_{dif}} R_{MED} \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Un cop separada la fracció directa de la radiació mesura, es compensa el seu valor per l'angle d'incidència. El resultat que ens queda es la radiació solar directa enfocada R_{FOC} (angle d'incidència nul):

$$R_{FOC} = \frac{R_{Dir}}{\sin(\alpha_s)} \quad (\text{Ec. 4.15})$$

4.3.2. Càlcul d'energia, potència tèrmica i elèctrica

Un cop s'ha calculat radiació solar directa que rep el model de Dish-Stirling durant els diferents dies d'estudi, es procedeix a calcular l'energia solar total rebuda gràcies a aquesta radiació i es calculen les potències tèrmica i elèctrica a partir de les dades registrades pel propi sistema Dish-Stirling. En la Taula 4.6. es poden veure els diferents càlculs realitzats.

Dada		Equació	Paràmetres
Potència d'entrada	solar	$P_i = R_{FOC} \cdot A \text{ [kW]}$	R_{FOC} Radiació solar directa enfocada [kW/m ²] A Àrea d'obertura [m ²]
Energia d'entrada	solar	$E_i = P_i \cdot T \text{ [kWh]}$	$P_i(i)$ Potència solar d'entrada [kW] T Període [h]
Potència tèrmica		$P_t = \frac{T_C - T_H}{60} \cdot C_W \cdot F \text{ [kW]}$	C_W Capacitat calorífica ¹ del líquid refrigerant [kJ / K · kg]. F Cabal del refrigerant [l/min]. T_C Temperatura de sortida del refrigerant [°C]. T_H Temperatura d'entrada del refrigerant [°C].
Energia tèrmica		$E_t = P_t \cdot T \text{ [kWh]}$	P_t Potència tèrmica [kW]. T Període [h]
Energia elèctrica		$E_e = P_e \cdot T \text{ [kWh]}$	P_e Potència elèctrica [kW]. T Període [h]

Taula 4.6. Càlculs realitzats d'energia i potència

4.3.3. Resultats del model real

En la Taula 4.7. es poden observar els resultats obtinguts de irradiància, energies i eficiències dels diferents dies estudiats. Com un primer anàlisi es veu que els resultats dels dies estudiats a l'any 2015 i a l'any 2016 son bastant semblants encara que, de mitjana, s'ha

¹ Es considera 4,18 en aquest cas (aigua)

produït més energia elèctrica i tèrmica durant l'any 2016 en unes condicions semblants a les del 2015.

L'eficiència tèrmica real és d'un 37% i l'elèctrica ronda el 10%. A la Figura 4.4. es representa l'energia solar les energies tèrmiques i elèctriques reals produïdes. Sembla que no hi ha gaire relació entre l'energia solar que es rep i les energies tèrmiques i elèctriques que es generen.

Data	Irradiància mitjana [W/m ²]	Energia solar rebuda [kWh]	Energia tèrmica produïda [kWh]	Energia elèctrica produïda [kWh]	Eficiència tèrmica [%]	Eficiència elèctrica [%]
21/04/2015	488,95	59,58	23,06	6,547	38,7	11,0
23/04/2015	500,54	58,39	23,62	6,4	40,5	11,0
28/04/2015	545,98	62,74	21,42	5,51	34,1	8,8
22/05/2015	535,28	82,46	28,49	7,31	34,6	8,9
23/05/2015	531,36	74,41	24,23	5,23	32,6	7,0
16/04/2016	520,15	55,87	22,88	6,12	41,0	11,0
23/04/2016	526,16	55,65	23,83	6,69	42,8	12,0
01/05/2016	534,3	75,11	27,01	7,53	36,0	10,0
02/05/2016	533,2	74,11	26,4	7,34	35,6	9,9
04/05/2016	518,22	73,89	28,99	7,62	39,2	10,3
Mitjana 2015	520,42	67,52	24,16	6,19	36,08	9,33
Mitjana 2016	526,41	66,93	25,82	7,06	38,92	10,64
Mitjana	523,41	67,22	24,99	6,63	37,50	9,98

Taula 4.7. Resultats de les dades reals

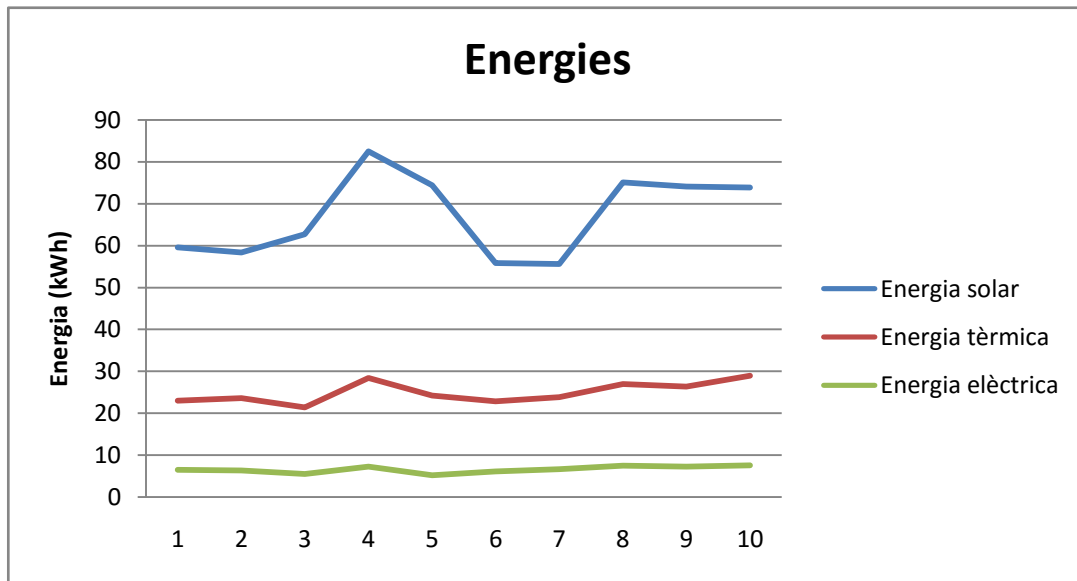


Figura 4.4. Representació de les diferents energies per dia

4.4. Obtenció de dades en la simulació

La simulació utilitzada en aquest treball es troba a la Figura 4.5., el programa utilitzat es MATLAB Simulink®. Aquesta simulació va ser creada i estudiada en un antic projecte del mateix centre.

La simulació està definida per a una entrada d'irradiància constant, així com la temperatura ambient i la pressió ambiental que també es consideren constants. La velocitat del vent es considera en tot moment 0.

Per tal que la simulació sigui l'adequada es modifiquen alguns paràmetres abans d'executar-la. Malauradament, hi ha moltes dades que són aproximades ja que el fabricant no proporciona molta informació.

Es defineixen altres paràmetres disponibles com l'àrea reflectant neta ($9,58 \text{ m}^2$) i l'àrea d'obertura del receptor ($0,1 \text{ m}$) i s'ha considerat el hidrogen com a gas de treball dintre del motor Stirling.

A continuació, es simulen els diferents dies que s'han considerat vàlids en els apartats anteriors, per cada simulació s'han canviat les característiques pròpies de cada dia, concretament: la irradiància mitjana, la temperatura ambient mitjana i la pressió atmosfèrica mitjana, totes elles considerades constants durant la simulació.

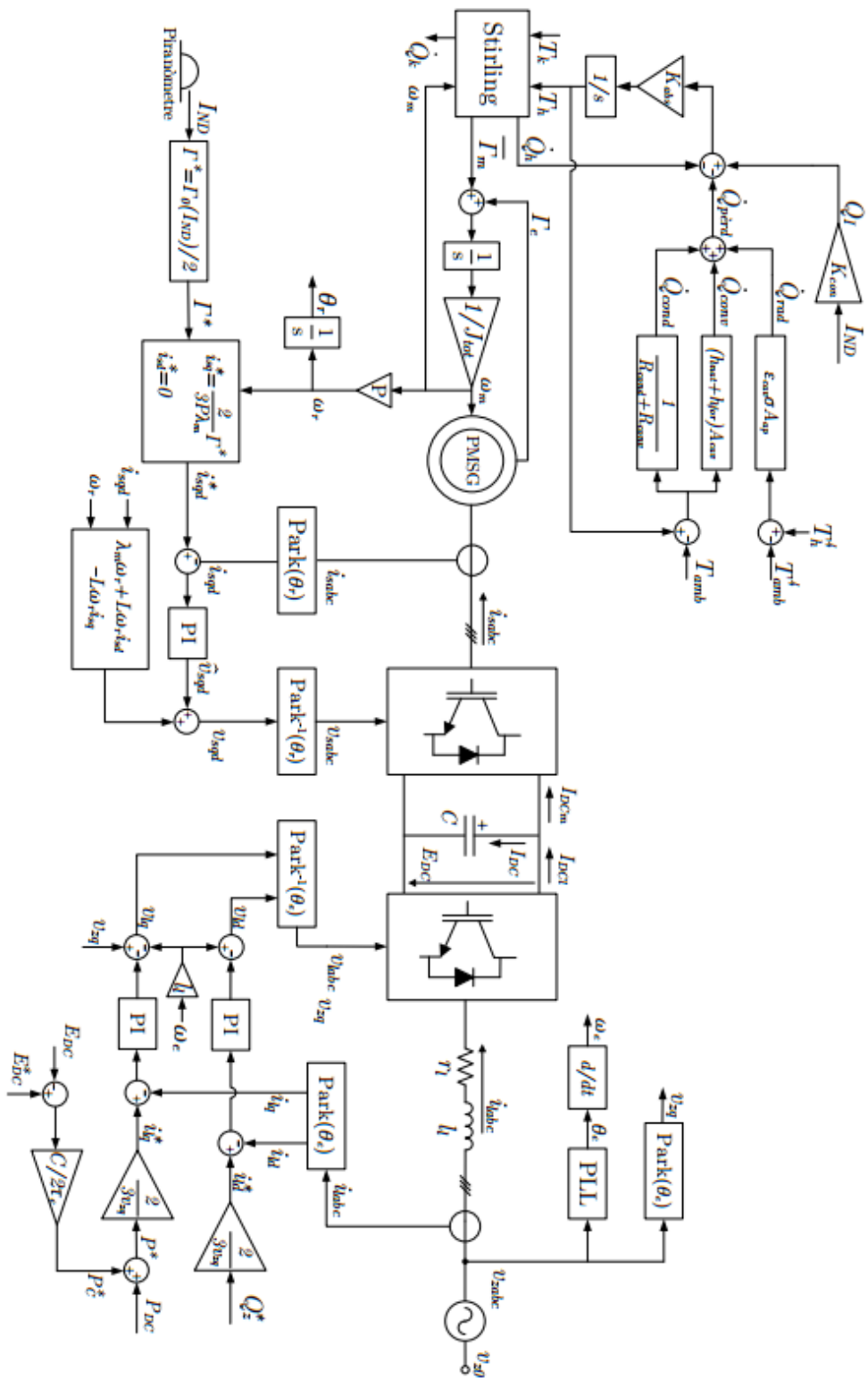


Figura 4.5. Simulació utilitzada

En la Taula 4.8. es poden veure les dades que s'han canviat per la simulació de cada dia en concret.

Data	Irradiància mitjana [W/m²]	Temperatura ambient mitjana [K]	Pressió atmosfèrica mitjana [hPa]
21/04/2015	488,95	294,53	1023,5
23/04/2015	500,54	293,18	1017,3
28/04/2015	545,98	291,99	1016,1
22/05/2015	535,28	293,16	1020,3
23/05/2015	531,36	294,65	1016
16/04/2016	520,15	295,11	1008,9
23/04/2016	526,16	293,11	1013,1
01/05/2016	534,3	289,81	1019,7
02/05/2016	533,2	292,55	1018,7
04/05/2016	518,22	294,53	1019,7

Taula 4.8. Dades variables en cada simulació

4.4.1. Resultats obtinguts

Amb els resultats obtinguts en la simulació podem fer una valoració de la potència elèctrica rebuda per cada dia i fer una valoració per la energia que s'obtindria amb aquesta potència treballant el dia corresponent (es considera com si es rep una potencia constant durant les hores treballades durant el dia corresponent). En la Figura 4.6. es pot veure diferents casos de la potència elèctrica que s'obté en la simulació segons la irradiància que es defineix i en la Figura 4.7. es poden veure la potència de sortida del motor Stirling i la potència elèctrica generada el dia 22/05/2015.

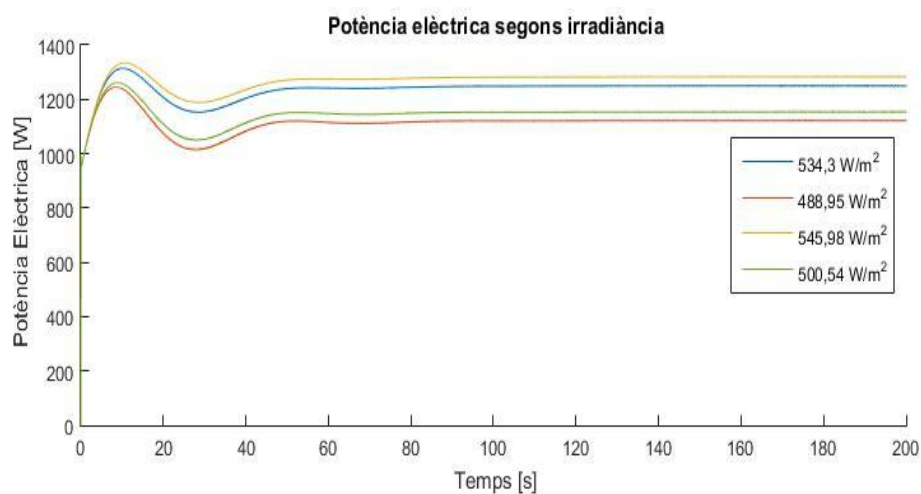


Figura 4.6. Potències elèctriques generades segons irradiància

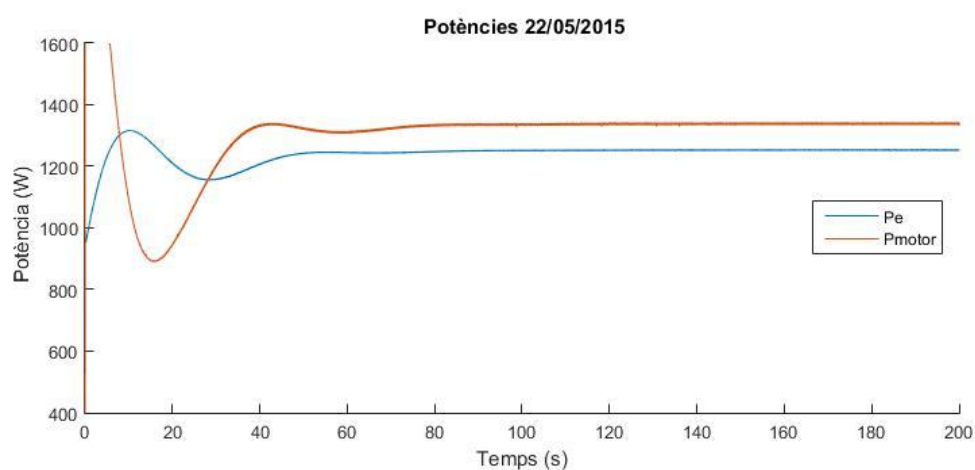


Figura 4.7. Potència de sortida de motor i elèctrica pel dia 22/05/2015

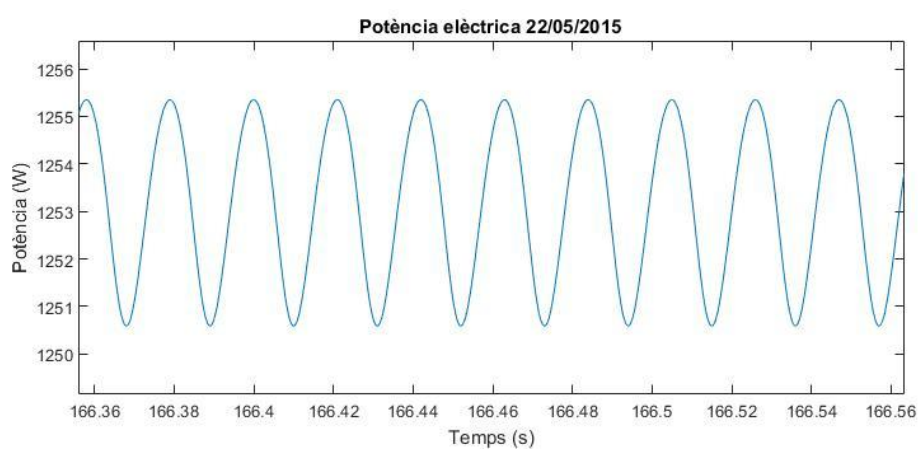


Figura 4.8. Detall de la potència elèctrica

En la taula següent es mostren tots el valors de potència mitjana en la simulació dels diferents dies estudiats.

Data	Irradiància mitjana [W/m ²]	Potència elèctrica simulada [W]	Hores de treball total [h]	Energia elèctrica simulada [kWh]	Eficiència elèctrica simulada [%]	Eficiència elèctrica real [%]
21/04/2015	488,95	1121,65	11,33	10,40	17,5	11,0
23/04/2015	500,54	1153,71	10,67	10,21	17,5	11,0
28/04/2015	545,98	1283,37	10,33	11,17	17,8	8,8
22/05/2015	535,28	1252,58	12,42	13,92	16,9	8,9
23/05/2015	531,36	1242,33	11,33	12,52	16,8	7,0
16/04/2016	520,15	1210,28	10,08	9,70	17,4	11,0
23/04/2016	526,16	1227,21	9,67	9,76	17,5	12,0
01/05/2016	534,3	1249,77	11,83	12,48	16,6	10,0
02/05/2016	533,2	1106,41	11,83	12,30	16,6	9,9
04/05/2016	518,22	1093,66	11,92	12,24	16,6	10,3

Taula 4.9. Dades elèctriques de la simulació

Pel l'obtenció de l'energia elèctrica simulada es realitza el següent càlcul:

$$E_e = P_e H \frac{1}{1000} \quad (\text{Ec. 4.15.})$$

On

P_e = Potència elèctrica simulada [W]

H = hores de treball total [h]

Com es veu en la taula anterior l'eficiència elèctrica en les simulacions és bastant més elevada que la obtinguda amb les dades reals. De fet, segons la simulació, es supera 1kW de potència nominal cosa que no succeeix en cap cas amb les dades reals, per tant el

rendiment general de la simulació pel que fa a l'energia elèctrica generada està molt per sobre del que dona el sistema estudiat.

Es fa un estudi similar pel que fa a la potència tèrmica, el calor que expulsa el volum fred és la potència que s'aprofita per escalfar l'aigua que més endavant s'utilitzarà per les dutxes del gimnàs.

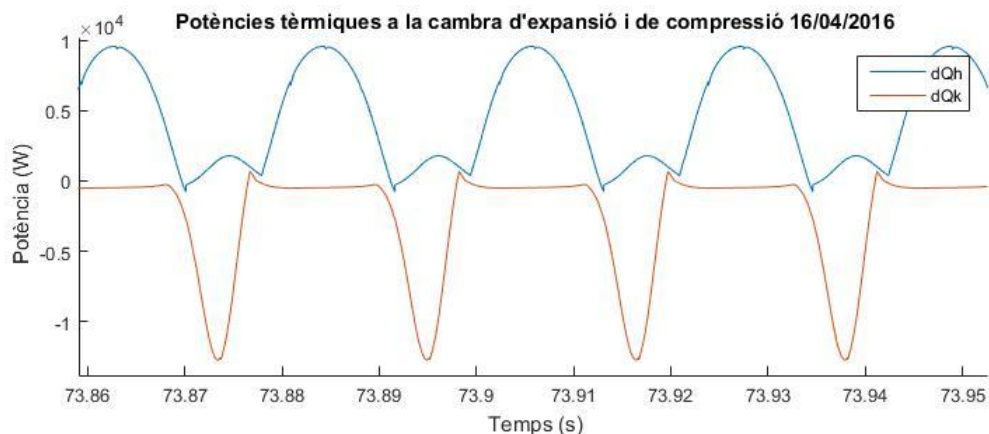


Figura 4.9. Potències tèrmiques instantànies

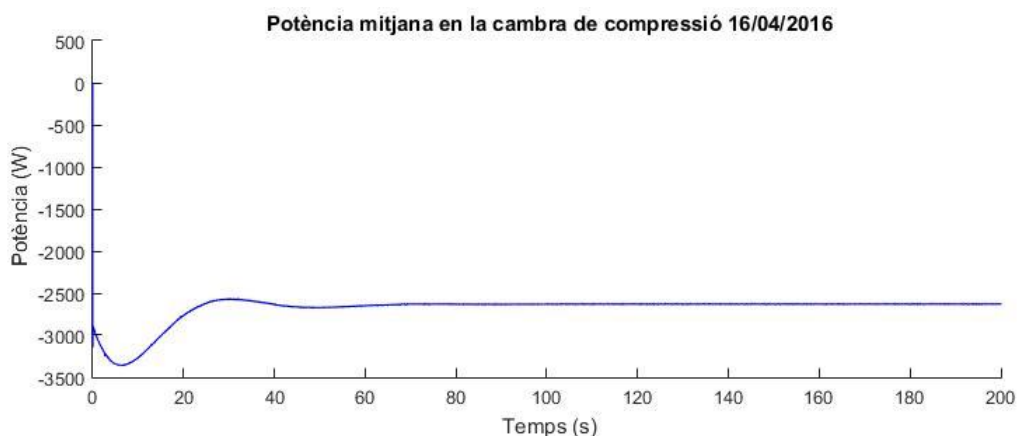


Figura 4.10. Potència mitjana que s'expulsa en la cambra de compressió

Data	Irradiància mitjana [W/m^2]	Potència tèrmica simulada [W]	Hores de treball total [h]	Energia tèrmica simulada [kWh]	Eficiència tèrmica simulada [%]	Eficiència tèrmica real [%]
21/04/2015	488,95	2496,49	11,33	28,29	47,5	38,7

23/04/2015	500,54	2546,22	10,67	27,16	46,5	40,5
28/04/2015	545,98	2743,71	10,33	28,35	45,2	34,1
22/05/2015	535,28	2699,58	12,42	33,52	40,7	34,6
23/05/2015	531,36	2682,28	11,33	30,40	40,9	32,6
16/04/2016	520,15	2630,02	10,08	26,52	47,5	41,0
23/04/2016	526,16	2660,91	9,67	25,72	46,2	42,8
01/05/2016	534,3	2695,34	11,83	31,90	42,5	36,0
02/05/2016	533,2	2690,55	11,83	31,84	43,0	35,6
04/05/2016	518,22	2629,29	11,92	31,33	42,4	39,2

Taula 4.10. Dades d'energia tèrmica en les simulacions

Els rendiments d'energia tèrmica en la simulació ja s'acosten més amb les dades del model real que no pas l'energia elèctrica. Més endavant es veurà que s'acosten moltíssim a la simulació aproximada.

Lamentablement amb les dades que ens proporciona el model real no podem veure les característiques de les diferents etapes que componen el disc Dish-Stirling, per tant no es pot estudiar amb les dades reals en quins punts es perd més potència i estudiar els motius de per què aquesta diferència de rendiment elèctric entre el model simulat i el real.

En el següent apartat s'ha intentat solucionar aquest problema amb una aproximació donada pel propi fabricant.

4.5. Aproximació del model real

El fabricant proporciona un esquema (Figura), separat per fases amb rendiments supòsits per a cadascuna. La potència que es transmet en cada etapa per unitat que està escrit en blau. Com mostra la figura, el pas més crític del procés és el pas pel motor Stirling. En aquest cas, el rendiment elèctric és més baix que alguns productes o models disponibles pel fet que una part important de l'energia es pren per les pèrdues tèrmiques, que s'utilitzen per escalfar l'aigua.

Amb aquesta aproximació del model, ara es té una base per comparar les dades en la simulació amb les diferents etapes que componen aquest sistema (tot i que ja es veu que els rendiments teòrics, tant tèrmics com elèctrics, es troben per sobre del que ens han donat les dades reals, sobretot en el cas del rendiment elèctric).

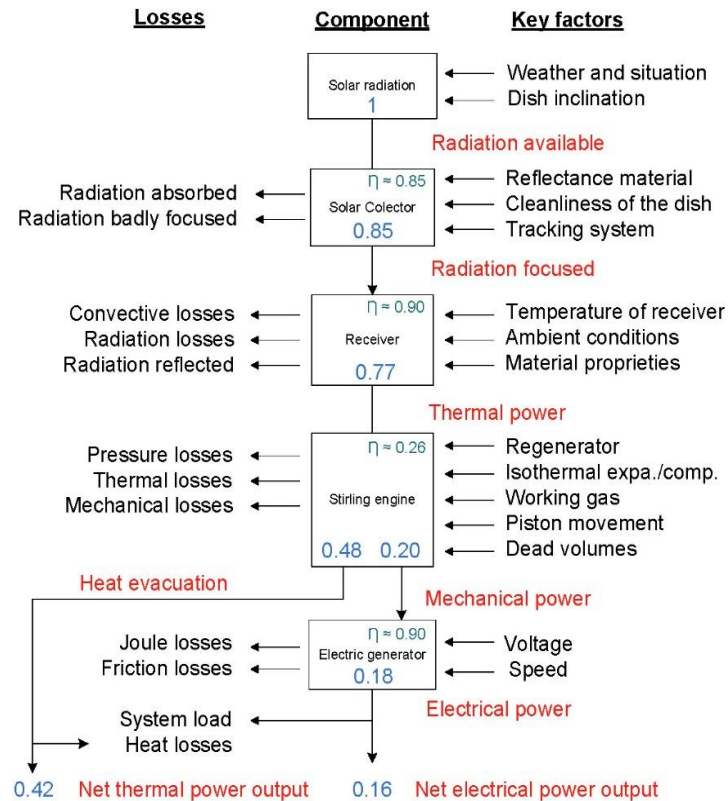


Figura 4.11. Model amb rendiments aproximat facilitat pel fabricant

Així doncs, s'han agafat les dades de rendiments per a cada fase en les diferents simulacions i s'han comparat amb les d'aquesta aproximació. En les figures següents es mostren els rendiments de les diferents etapes obtingudes dels dies 01/05/2016 i 23/05/2015 com a exemple i en la Taula 4.11. hi ha els resultats per a tots els dies.

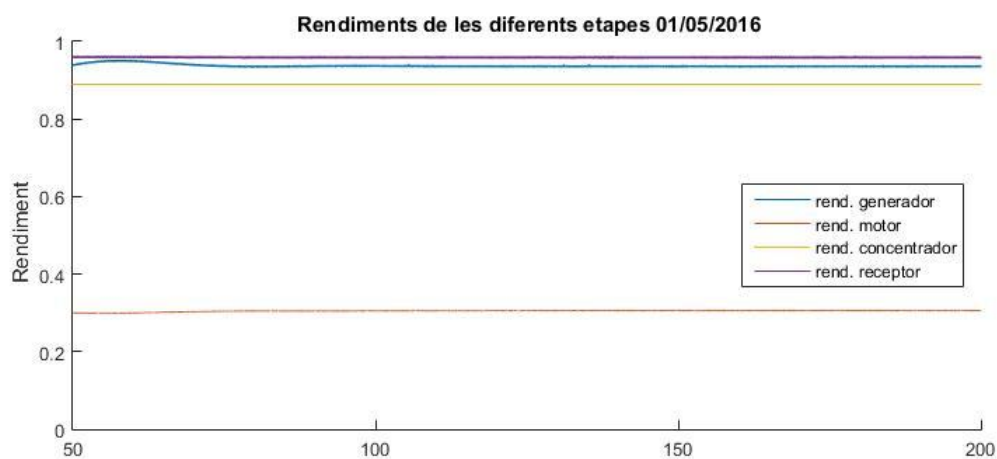


Figura 4.12. Rendiments de les diferents etapes 01/05/2016

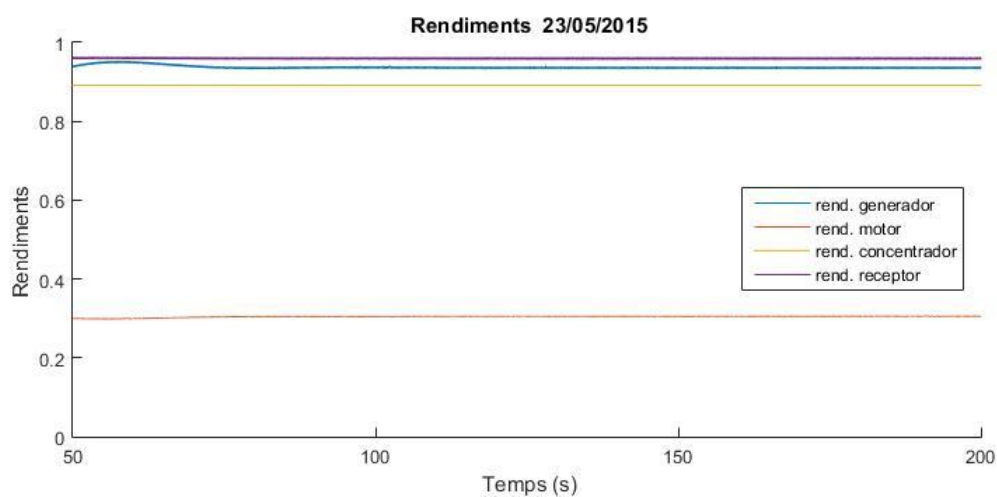


Figura 4.13. Rendiments de les diferents etapes 23/05/2015

Data	Rendiment concentrador [%]	Rendiment receptor [%]	Rendiment Stirling [%]	Rendiment Generador [%]
21/04/2015	89	95,62	30,14	93,12
23/04/2015	89	95,72	30,26	93,35
28/04/2015	89	95,97	30,67	93,65
22/05/2015	89	95,98	30,57	93,66

23/05/2015	89	95,95	30,49	93,57
16/04/2016	89	95,89	30,45	93,6
23/04/2016	89	95,94	30,5	93,42
01/05/2016	89	95,82	30,54	93,72
02/05/2016	89	95,96	30,53	93,88
04/05/2016	89	95,88	30,45	93,71
Mitjana	89	95,873	30,46	93,568

Taula 4.11. Rendiments obtinguts en les simulacions

S'observa que els rendiments són tots més alts que l'aproximació del model real, com és lògic ja que els resultats que ens dona la simulació són sortides de potència molt més elevades. En el següent apartat es tractarà de millorar aquesta simulació i apropar-la als rendiments i les dades que ens dona el model real.

5. Adaptació i millora de la simulació

En aquest apartat es realitzen diferents adaptacions i comprovacions en el sistema per tal d'intentar que les dades que simula donin una resposta el més similar possible a les obtingudes amb el model real.

Com s'han vist en l'apartat anterior, la resposta global del sistema deixa uns rendiments bastant més elevats que l'aproximació i té sentit, doncs, que les potències que ens donen les simulacions són bastant més elevades que les dades reals.

En aquest apartat, com s'ha vist que en general els diferents dies estudiats no donen dades molt diferents entre si, es fa una mitjana de totes les dades necessàries per a la simulació.

Data	Irradiància mitjana [W/m ²]	Temperatura ambient mitjana [K]	Pressió ambiental mitjana [hPa]
21/04/2015	488,95	294,53	1023,5
23/04/2015	500,54	293,18	1017,3
28/04/2015	545,98	291,99	1016,1
22/05/2015	535,28	293,16	1020,3
23/05/2015	531,36	294,65	1016,0
16/04/2016	520,15	295,11	1008,9
23/04/2016	526,16	293,11	1013,1
01/05/2016	534,3	289,81	1019,7
02/05/2016	533,2	292,55	1018,7
04/05/2016	518,22	294,53	1019,7
Mitjana	523,41	293,26082	1017,3

Taula 5.1. Dades utilitzades per a simular

5.1. Pèrdues en el motor Stirling

Les pèrdues d'energia en un motor Stirling són degudes a processos mecànics i termodinàmics. La compressió i l'expansió no són adiabàtiques. Els intercanviadors no són ideals ja que hi ha pèrdues de pressió i de calor. Per predir amb exactitud la energia i l'eficiència del motor, es necessita comprendre quines són les principals pèrdues mecàniques.

Les pèrdues per caiguda de pressió en els intercanviadors de calor ja es contemplen en la simulació però hi ha altres pèrdues que s'introdueixen a continuació.

5.1.1. Pèrdues d'energia degudes a conducció interna

L'energia perduda a causa de la conductivitat interna entre les parts calentes i fredes del motor és directament proporcional a la diferència de temperatura a la sortida del intercanviador, les expressions següents mostren el seu comportament:

$$d\dot{Q}_{Pcdr} = k_{cdr} \frac{A_r}{L_r} (T_{rh} - T_{kr}) \quad (\text{Ec. 5.1})$$

$$d\dot{Q}_{Pcdk} = k_{cdk} \frac{A_k}{L_k} (T_{kr} - T_{ck}) \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$d\dot{Q}_{Pcdh} = k_{cdh} \frac{A_h}{L_h} (T_{he} - T_{rh}) \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Així doncs, les pèrdues totals per conducció són:

$$d\dot{Q}_{PcdT} = d\dot{Q}_{Pcdr} + d\dot{Q}_{Pcdk} + d\dot{Q}_{Pcdh} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Amb,

- $k_{cdr}, k_{cdk}, k_{cdh}$ conductivitats tèrmiques en el regenerador, la cambra de compressió i la cambra d'expansió respectivament [W/m·K].
- A_r, A_k, A_h àrea interna del regenerador, la cambra de compressió i la cambra d'expansió respectivament [m²].
- L_r, L_k, L_h longitud del regenerador, la cambra de compressió i la cambra d'expansió respectivament [m].

5.1.2. Pèrdues per conducció externa

Les pèrdues per conducció externa es donen en el regenerador en no ser aquest adiabàtic. Aquestes pèrdues s'especifiquen en el coeficient de adiabaticidad del regenerador, $\varepsilon \leq 1$, definit com el quocient entre la calor cedit al regenerador pel gas de treball en el seu camí cap al cilindre de compressió i el calor rebut pel gas de treball en el regenerador al seu pas cap al cilindre d'expansió. D'aquí es dedueix que, si no estem en el cas ideal d' $\varepsilon = 1$, la calor robada pel regenerador al fluid en el seu moviment cap a l'espai de compressió no es restituirà per complet en el seu moviment de tornada. L'energia perduda per conducció externa és:

$$d\dot{Q}_{Pext} = (1 - \varepsilon)(d\dot{Q}_{rk} + d\dot{Q}_{rh}) \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Amb,

ε = eficiència del regenerador (ja calculada en el model antic)

$$d\dot{Q}_{rk} = \frac{Vr \cdot dp \cdot Cv}{R} - Cp \cdot Tck \cdot \dot{m}ck \quad (\text{Ec. 5.6})$$

$$d\dot{Q}_{rh} = \frac{Vr \cdot dp \cdot Cv}{R} + Cp \cdot Tch \cdot \dot{m}rh \quad (\text{Ec. 5.7})$$

5.1.3. Pèrdues de calor associades al desplaçament de l'èmbol

El moviment del pistó entre l'espai calent i fred dins el motor introdueix un altre mecanisme de transferència de calor en el sistema. Així es veu augmentada la transferència de calor entre la zona calenta i la freda. El desplaçador absorbeix una certa quantitat de calor de la superfície calenta que transporta fins a la zona freda, el valor es representa per l'expressió:

$$d\dot{Q}_{Pshl} = \frac{0,4 \cdot Z^2 \cdot k_{pis} \cdot D_d}{J \cdot L_d} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

On,

- J és la distància anular entre el desplaçador i el cilindre [m]
- k_{pis} és la conductivitat tèrmica del pistó [W/m·K]
- Z és la carrera del desplaçador [m]
- D_d és el diàmetre del pistó [m]
- L_d és la longitud del pistó [m]

5.1.4. Introducció i simulació de les pèrdues

En la Taula 5.2. es tenen els paràmetres necessaris pels càlculs d'aquestes pèrdues, alguna dada és aproximada ja que no es tenen les especificacions del fabricant. Altres dades com les diferents temperatures, els fluxos de masses i l'efectivitat del regenerador ja estaven definides a la simulació o bé són paràmetres ja definits com per exemple C_p i C_v definits pel gas de treball.

ID	Unitats	Valor
k_{cdr}	W/m·K	25
k_{cdk}	W/m·K	25
k_{cdh}	W/m·K	25
A_r	m ²	2e-4
A_k	m ²	3e-4
A_h	m ²	3e-4
L_r	m	0,03
L_k	m	0,05
L_h	m	0,05
J	m	0,02
k_{pis}	W/m·K	20
Z	m	0,03
D_d	m	0,055
L_d	m	0,05

Taula 5.2. Valors dels diferents paràmetres per a les pèrdues

S'introdueixen aquestes dades al MATLAB Simulink® i es creen les respectives matrius de pèrdues per a la simulació. En les Figures es poden veure les diferents pèrdues introduïdes al programa.

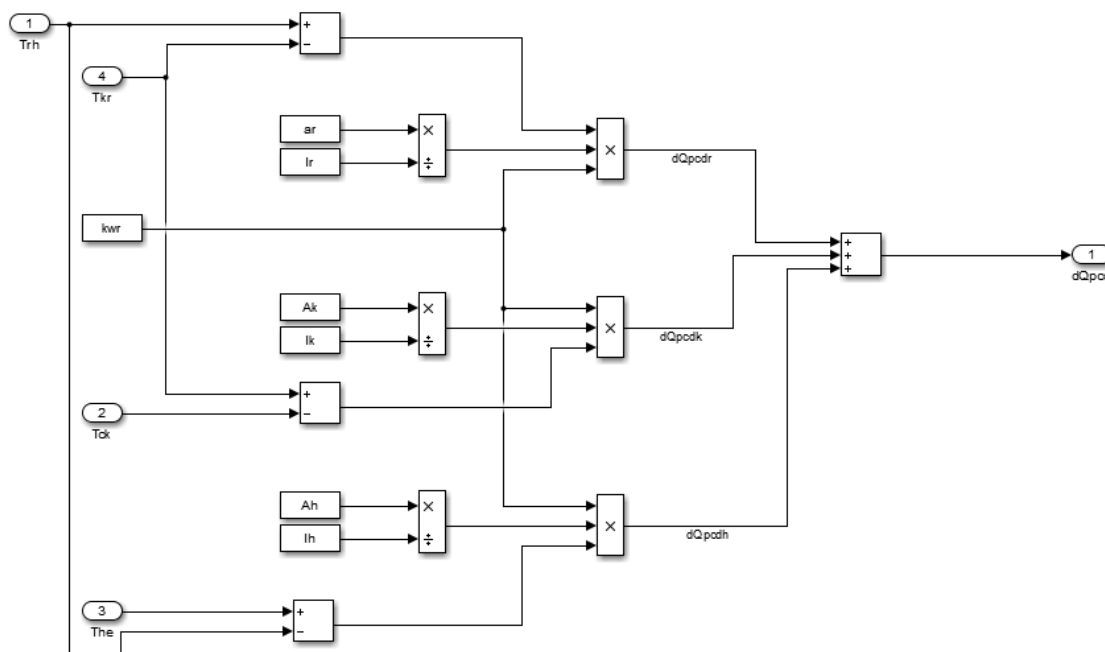


Figura 5.1. Simulació de les pèrdues per convecció interna

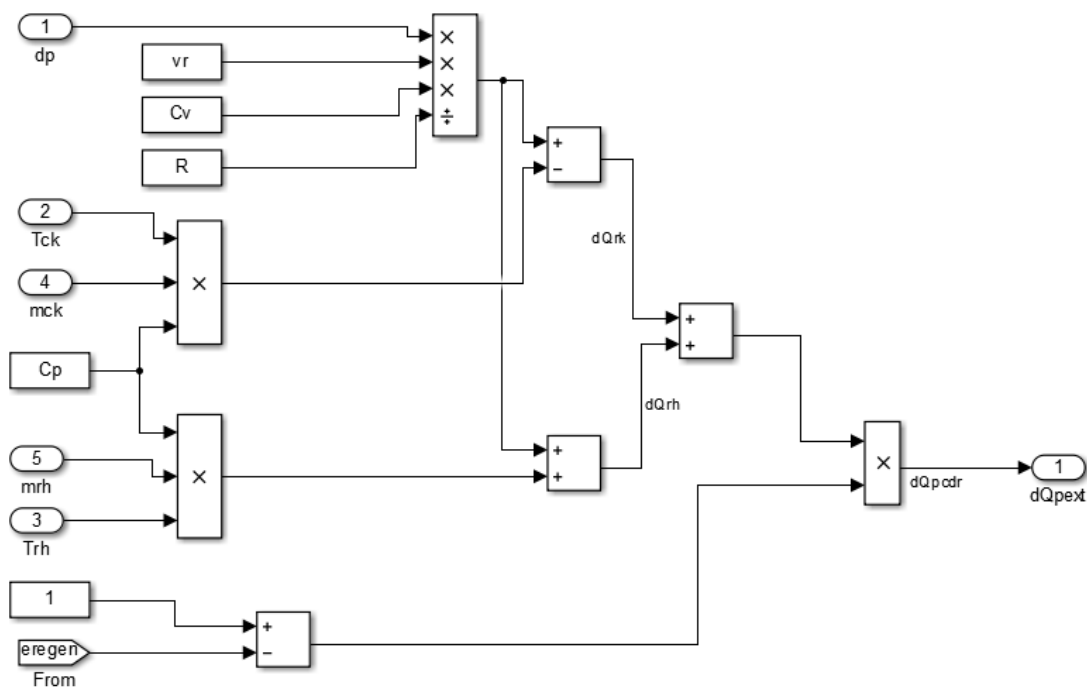


Figura 5.2. Simulació de les pèrdues per convecció externa

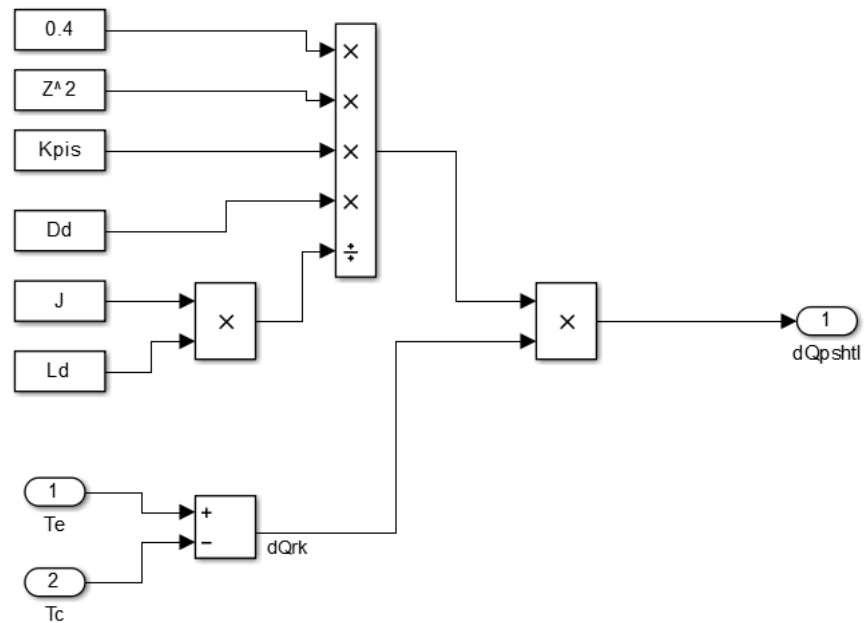


Figura 5.3. Simulació de les pèrdues pel desplaçament de l'èmbol

5.1.5. Resultats amb les noves pèrdues

Un cop s'han introduït i simulat les noves pèrdues es comparen amb les dades obtingudes anteriorment:

Simulació	Amb noves pèrdues	Anterior	Diferència
Potència elèctrica [W]	1164,7	1219,29	-54,59
Rendiment motor [%]	29,35	30,46	-1,11

Taula 5.3. Comparació de noves dades

Com es pot veure a la Taula 5.3. gràcies a aquestes pèrdues s'ha obtingut una millor aproximació de la simulació al model real ja que ha disminuït el seu rendiment i, per tant, la potència elèctrica que subministra. Tot i així aquesta millora suposa un canvi molt petit i encara s'està lluny de l'aproximació donada pel fabricant i, més encara, de les dades reals.

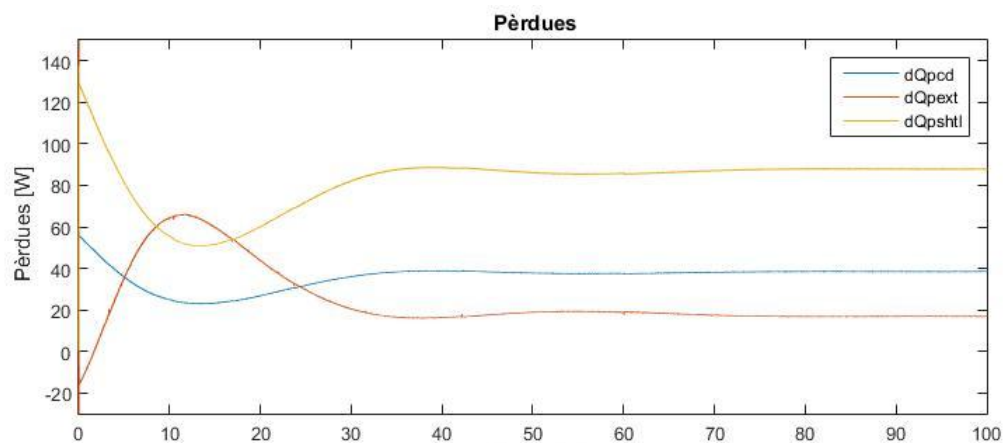


Figura 5.4. Valor de les diferents pèrdues

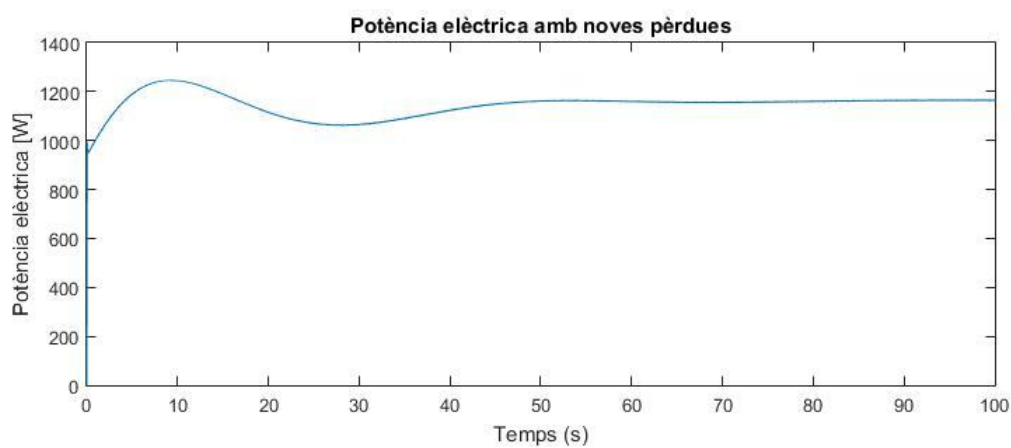


Figura 5.5. Nova potència elèctrica

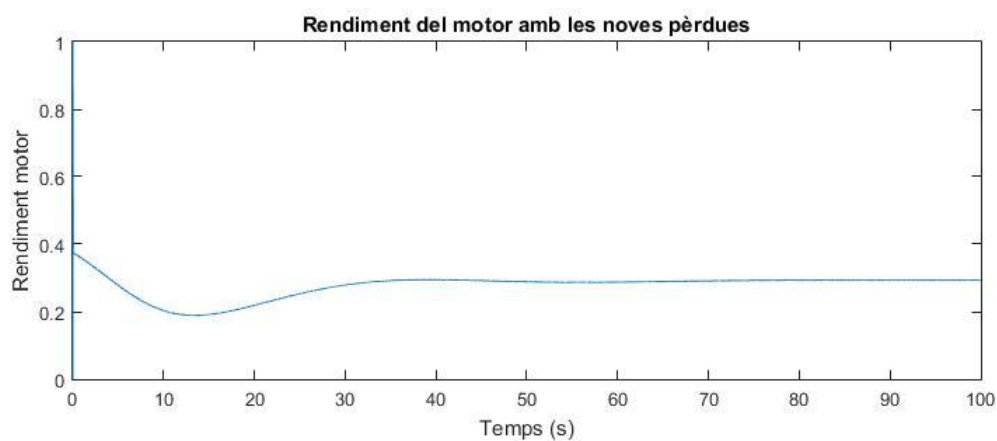
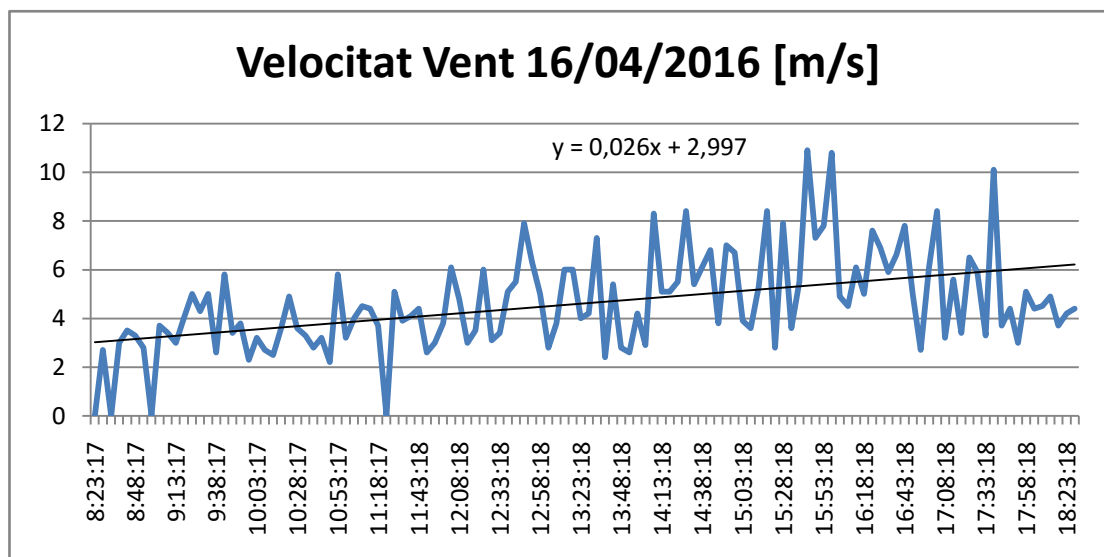
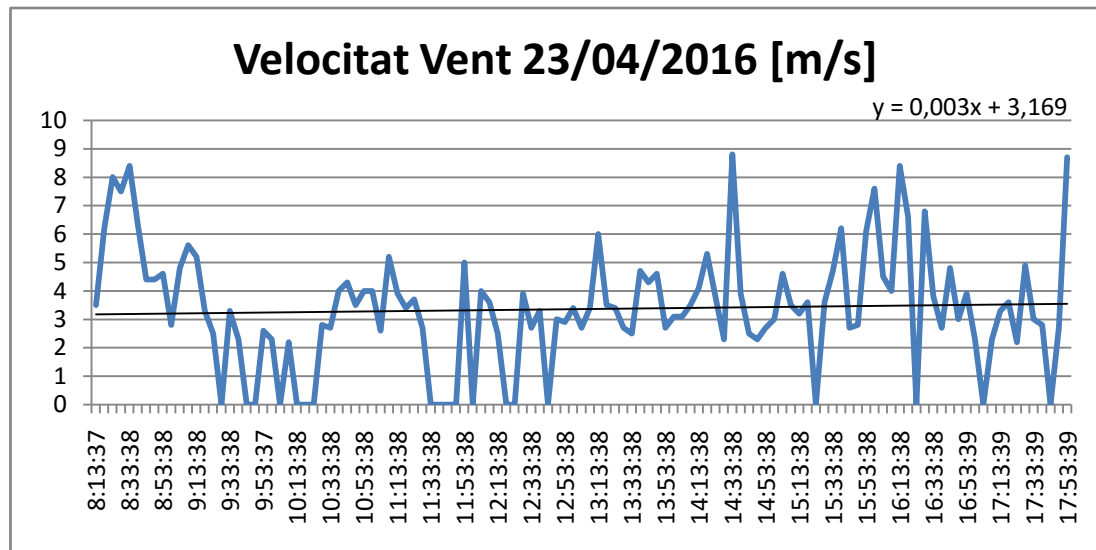


Figura 5.6. Nou rendiment del motor

5.2. Velocitat vent

Fins ara el vent no s'ha tingut en compte, en totes les simulacions s'ha considerat 0. Però aquest provoca pèrdues de convecció en el receptor que, com s'ha vist abans, te un rendiment molt elevat i, per això, es interessant estudiar fins a quin punt el vent pot influir.

A continuació es mostren 4 dies dels estudiats agafats a l'atzar per veure quina tendència pot tenir el vent.



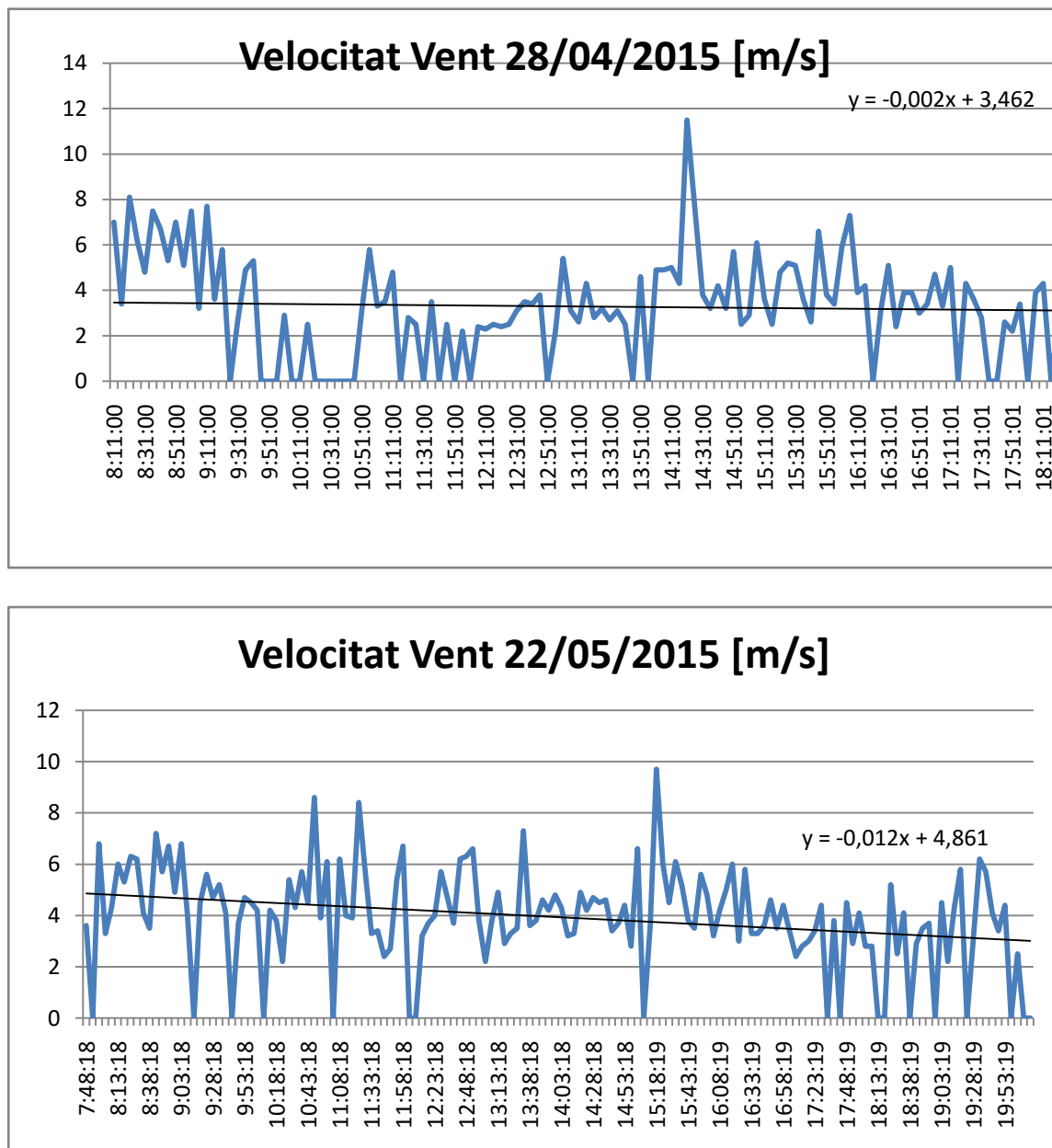


Figura 5.7. Velocitat del vent per a diferents dies

Com es veu en aquests 4 gràfics i com es veu també en el dies que no surten aquí, la tendència del vent es portar una velocitat més o menys mitjana durant el dia però amb molts pics tant de pujada com de baixada de velocitat.

S'ha volgut simular aquest comportament en el MATLAB Simulink®, per fer-ho s'ha utilitzat una eina anomenada 'Chirp Signal' que retorna valors dispersos en un rang amb freqüències variables. S'ha agafat una mitjana del vent propera a la que tenen tots el dies de

l'estudi, en aquest cas uns 3,5 m/s i s'ha considerat una variació que pot anar des de 0 fins a 7 m/s de velocitat del vent. En la següent Figura es pot veure com varia el vent amb aquesta eina.

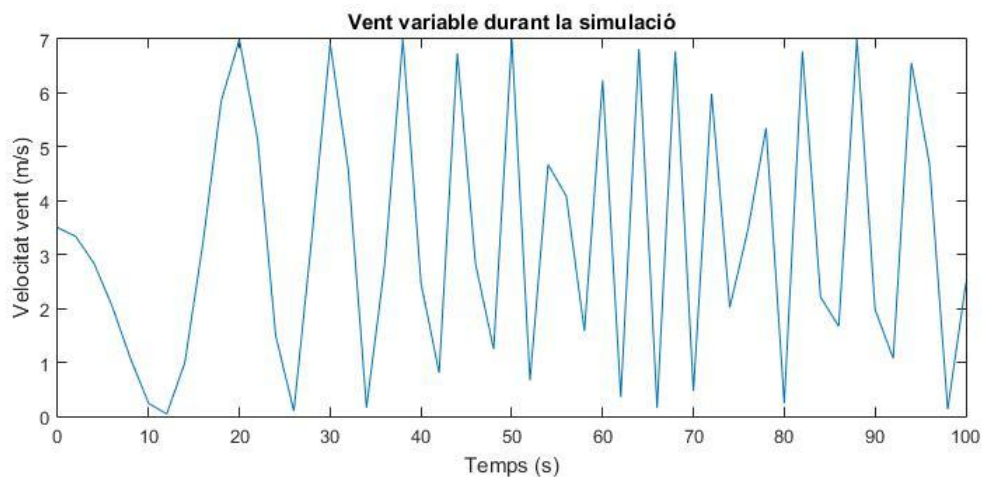


Figura 5.8. Velocitat del vent durant la simulació

És una aproximació bastant raonable, amb això es simula aquest vent tenint en compte que aquest varia de direcció i no afecta lo mateix si el vent és frontal cap a la cavitat del receptor o si és lateral. Per tal de simplificar els càlculs s'ha considerat un 50% de cada cas en la simulació.

Un cop s'han introduït i simulat les noves pèrdues es comparen amb les dades obtingudes anteriorment:

Simulació	Amb vent variable	Amb noves pèrdues	Diferència
Potència elèctrica [W]	1104,52	1164,7	-60,18
Rendiment motor [%]	27,58	29,35	-1,77
Rendiment receptor [%]	92,19	95,41	-3,22

Taula 5.4. Comparació de noves dades

Un cop més aquesta aproximació a una situació més real fa que el sistema s'apropi també a un rendiment més real. En aquest cas la millora de la simulació ha sigut una mica superior i

ja es veu que sobretot gràcies a la baixada del rendiment en el receptor, que es on tenen lloc les pèrdues per convecció que provoca el vent.

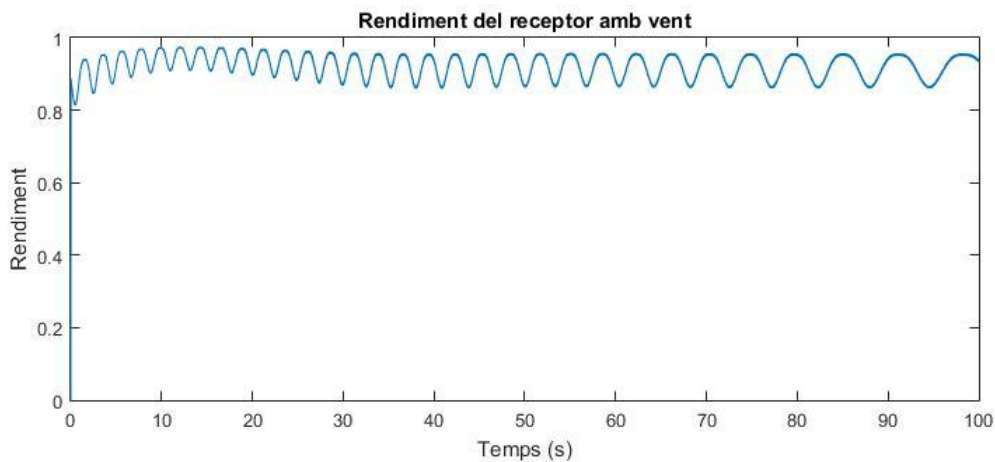
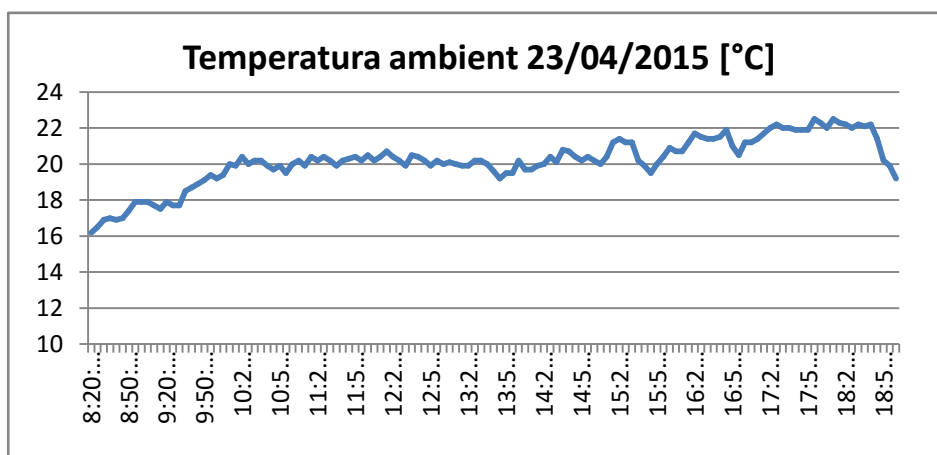


Figura 5.9. Rendiment del receptor amb la simulació del vent

5.3. Temperatura ambient

La temperatura ambient s'ha considerat, fins ara, una constant però en realitat és una dada que va variant durant el dia. El sistema Dish-Stirling proporciona el valor de la temperatura ambient durant el dia juntament amb la resta de dades, es per això que es pot veure el comportament de la temperatura durant el dia i intentar modelitzar-lo per tal de veure si això influeix en els resultats.

Les següents figures mostren el comportament de la temperatura ambient de 4 dels 10 dies de l'estudi.



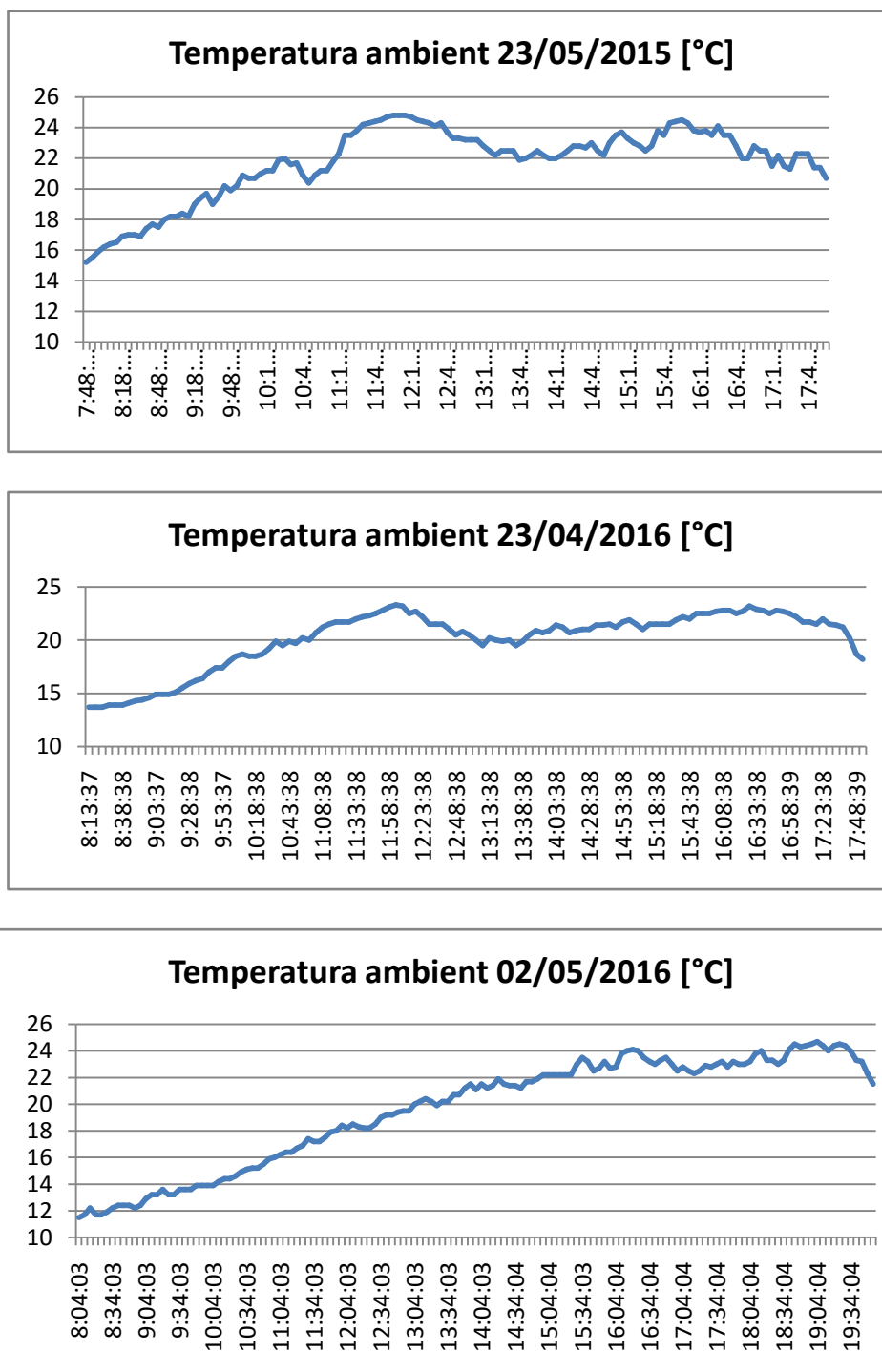


Figura 5.9. Valors de temperatura ambient per a dies diferents

Com es pot veure en els gràfics anteriors la temperatura ambient puja durant els inicis de la mesura de dades, arriba al màxim cap al migdia i manté una temperatura similar durant la

resta del dia tot això amb lleugeres pujades i baixades de temperatura dintre d'aquesta tendència.

Per simular aquest comportament en MATLAB Simulink® s'utilitza una eina anomenada 'Sine Wave' que simula un moviment sinusoidal i serveix per a la pujada de temperatura, després una senyal 'Ramp' que permet mantenir aquesta temperatura màxima i un altre cop la 'Chirp Signal' per aquestes petites variacions.

Mitjançant l'estudi de les dades dels diferents dies, s'ha agafat una temperatura inicial de 16°C i unes variacions de $\pm 0,6^\circ\text{C}$. En la Figura 5.10. es pot veure la variació de la temperatura ambient durant la simulació.

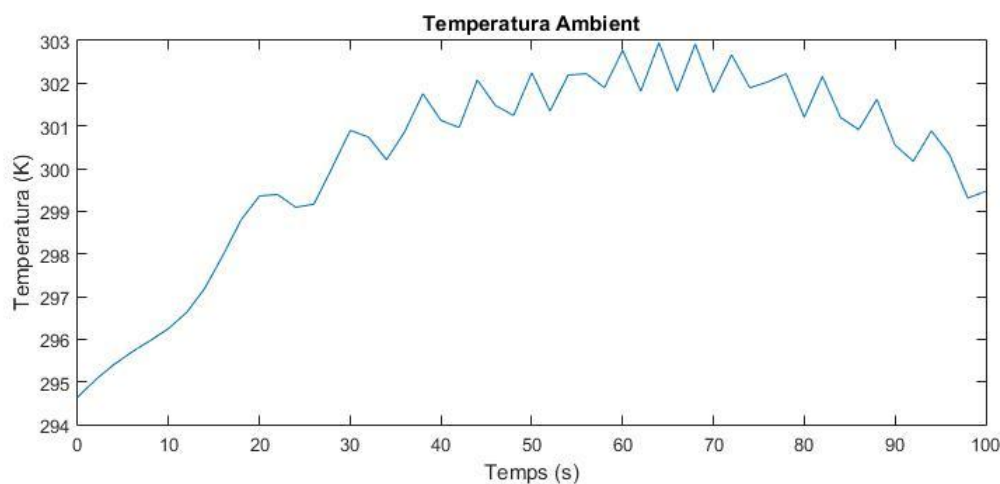


Figura 5.10. Temperatura ambient simulada

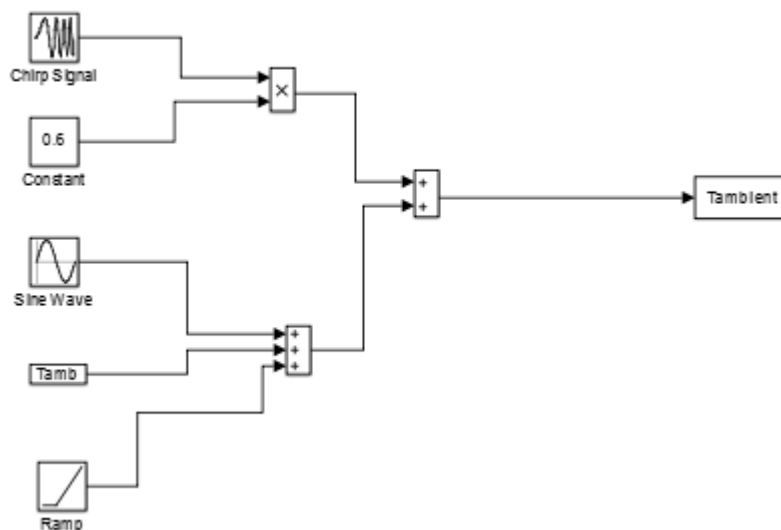


Figura 5.11. Simulació en MATLAB

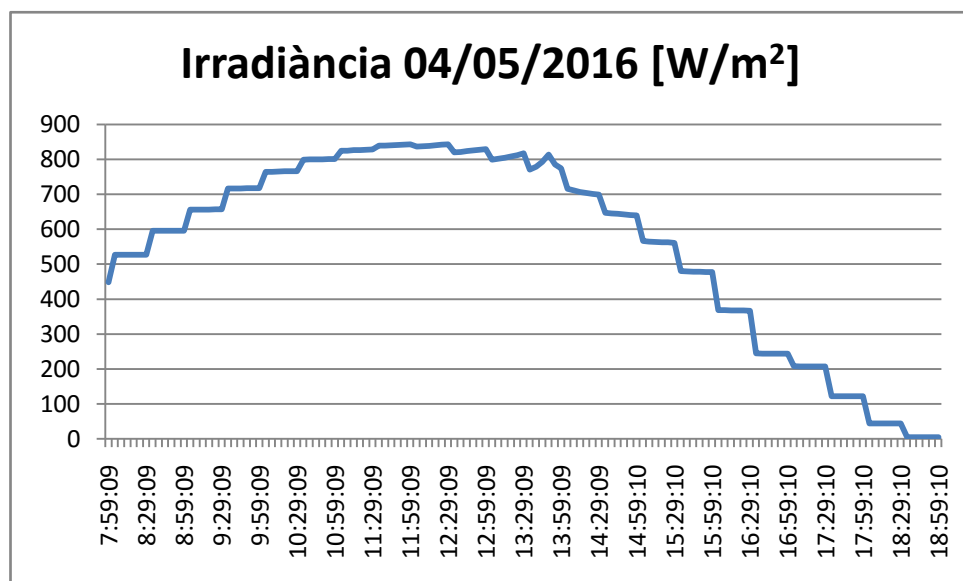
Simulació	Amb temperatura ambient variable	Amb vent variable	Diferència
Potència elèctrica [W]	1104,82	1104,52	0,3
Rendiment motor [%]	27,58	27,58	0
Rendiment receptor [%]	92,22	92,19	0,03

Taula 5.5. Comparació de noves dades

Sembla que la variació de la temperatura ambient durant el dia no té massa efecte en els resultats que s'obtenen. Les variacions en les dades en general són baixes, s'obté una potència elèctrica final molt semblant a la ja obtinguda en la simulació anterior.

5.4. Irradiància

Per últim, durant totes les simulacions la irradiància directa que arriba al concentrador es mantenia constant, però aquesta és variable durant el dia. Per això es considera simular aquesta variació i veure quins efectes té en els resultats finals. En les figures s'observa el valor de la Irradiància diària per a diferents dies.



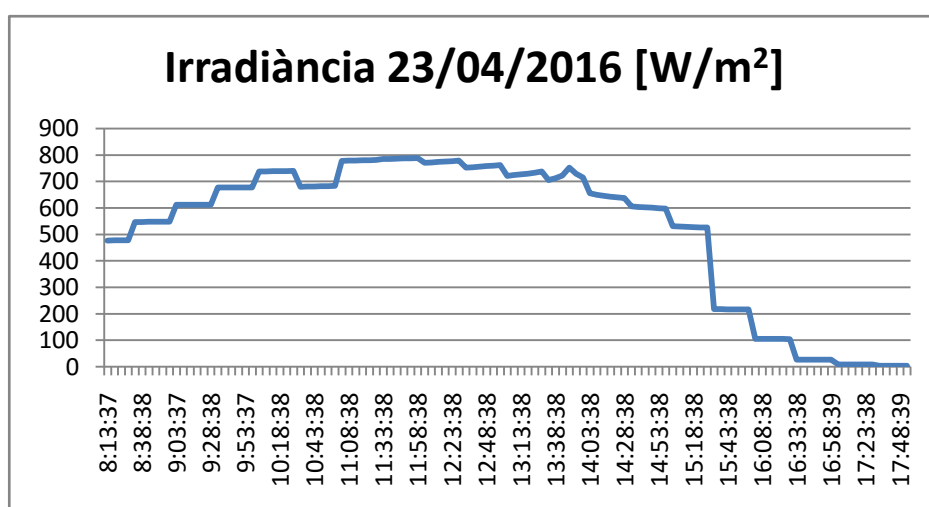
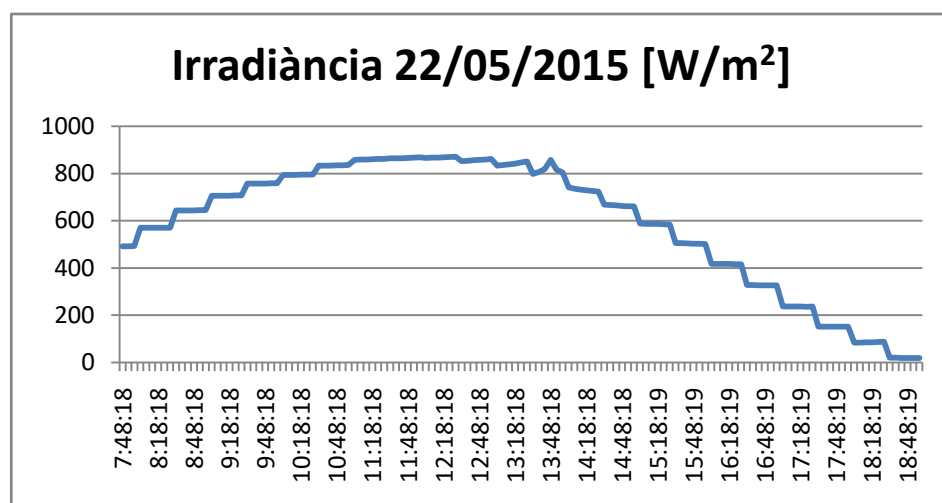
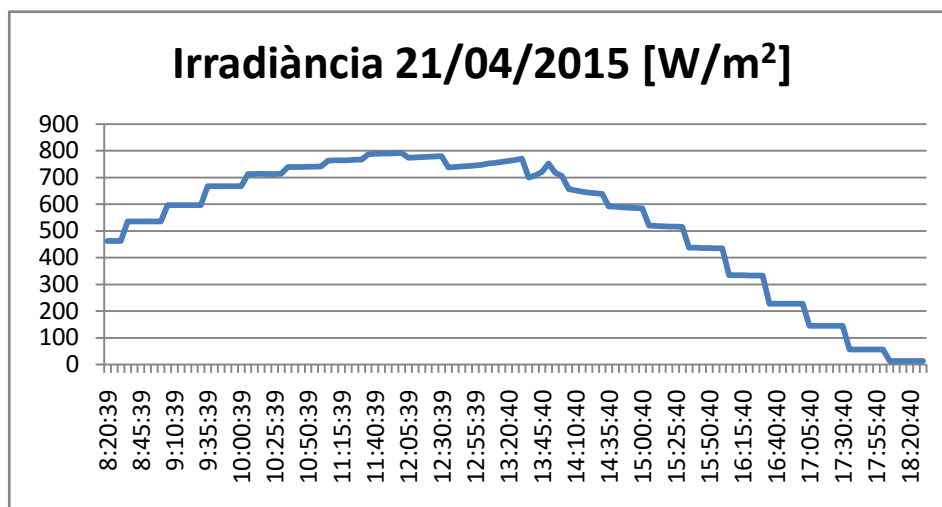


Figura 5.11. Variacions d'irradiància directa en diferents dies

Com es veu en els gràfics la tendència del valor de la irradiància va variant de forma molt semblant a una ona sinusoïdal, amb un valor inicial i un màxim. Per a simular això al programa MATLAB Simulink® es fa servir l'eina 'Sine Wave' que simula una ona sinusoïdal amb una amplada determinada.

Amb les dades que es tenen de les irradiàncies solars directes es simula amb una irradiància inicial de 400 W/m^2 , puja fins un màxim d'uns 800 W/m^2 i acaba fins a gairebé sense irradiància. A la Figura es pot veure la resposta que dona el programa.

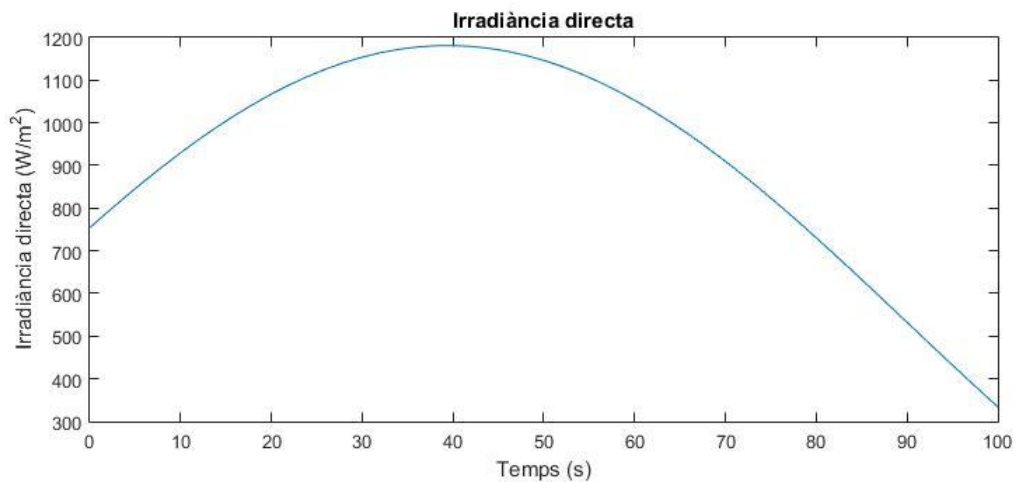


Figura 5.12. Irradiància en la simulació

Simulació	Amb irradiància variable	Amb vent variable	Diferència
Potència elèctrica [W]	1503	1104,52	398,48
Rendiment motor [%]	26,2	27,58	-1,38

Taula 5.6. Comparació de noves dades

Els resultats obtinguts en aquesta simulació són poc coherents ja que per una banda es millora el rendiment del motor però la mitjana de la potència elèctrica generada es molt superior a les simulacions anteriors, fet que indica una pujada del rendiment del sistema alarmant. Es per això que es considera aquesta última simulació com a invalida, s'hauria de comprovar quins motius fan que succeeixi això i millorar la simulació.

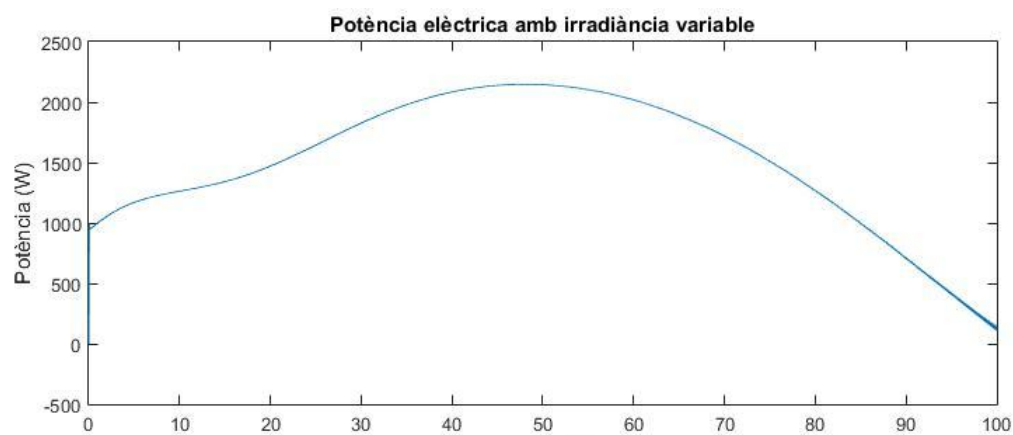


Figura 5.13. Potència elèctrica en la simulació amb irradiància variable

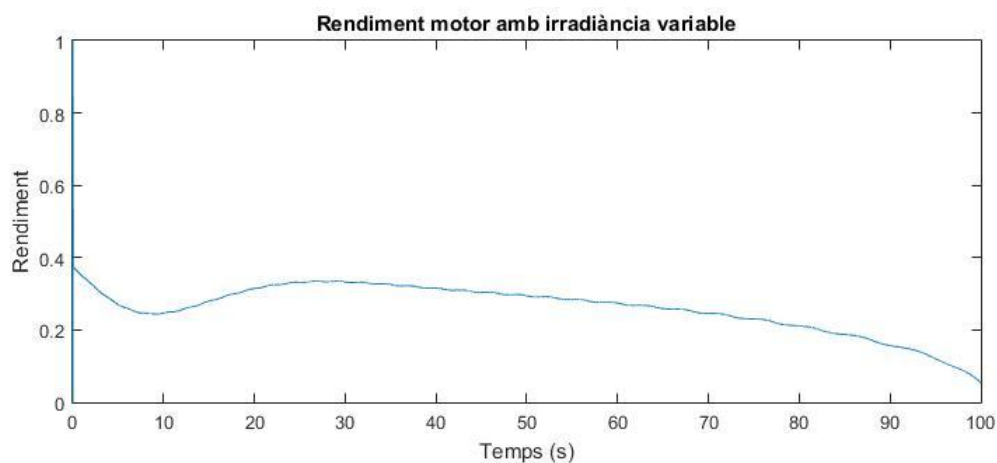


Figura 5.14. Rendiment del motor en la simulació amb irradiància variable

Conclusions

S'ha vist en uns càlculs inicials que les dades reals del sistema Dish-Stirling estan per sota del rendiment esperat. El disc no està treballant amb el seu màxim rendiment i no dona una potència propera a l'esperada (1 kW). També, s'ha comprovat que la simulació del model proporcionat dona uns rendiments superiors als esperats.

La resposta de la simulació millora al afegir noves pèrdues dintre del motor Stirling i d'introduir, també, la velocitat del vent, paràmetre que afegeix pèrdues per convecció. En canvi les variacions raonables de temperatura ambient, no afecten gairebé en res als resultats obtinguts.

Les limitacions de les dades i característiques del model que proporciona el fabricant i les poques dades de funcionament que es poden extreure dificulten molt un estudi per etapes per tal de simular millor el sistema i estudiar quins paràmetres i/o causes provoquen que aquest no estigui actuant amb el seu màxim rendiment.

També es recomana per a futurs estudis tenir dades recollides durant els diferents mesos de l'any. La limitació de tenir dades només de dos mesos concrets de l'any i amb la separació d'un any sencer entre elles no garanteixen que el comportament sigui el mateix per a la resta de l'any.

Per últim, com a propers passos a seguir, es podria modelar una variació de temperatura en el focus fred, ja que aquest s'ha considerat constant durant tot l'estudi i una aproximació del que pot variar donaria uns resultats més acurats. Una alternativa de disseny és l'escalat i semblança entre motors, aprofitant les corbes de funcionament d'altres o models de càlcul de rendiments a partir de paràmetres del motor i valors mitjans de funcionament.

Agraïments

Voldria agrair en primer lloc a l'Oriol Gomis per donar-me l'oportunitat de realitzar aquest projecte i per l'orientació i suport durant la seva realització. El mateix pel meu director del projecte Andreu Vidal que m'ha donat un cop de mà sempre que ha sigut necessari.

Agraïments també a l'Albert Nieto per facilitar-me i explicar-me la simulació del seu projecte de simulació d'un Dish-Stirling i per donar-me les informacions necessàries.

Agraeixo també a totes les persones que m'han acompanyat aquest temps, en especial a la família, pel suport durant el projecte i al llarg de tota la carrera.

Bibliografia

- [1] «Red Eléctrica de España | Avance del informe del Sistema Eléctrico español 2014,» [En línea]. Disponible:http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2014.pdf. [Últim accés:febrer 2016].
- [2] «Concentrating Solar Power, Department of Energy,» [En línea]. Disponible: <http://energy.gov/eere/energybasics/articles/concentrating-solar-power-basics>. [Últim accés: maig 2016].
- [3] Losada San José, Jorge.: *Análisis de un sistema de disco parabólico con motor stirling*. Madrid, 2009
- [4] “Trinum technical report”. INNOVA. .
- [5] “Trinium Assembly Manual”. INNOVA. 2012
- [6] “Trinium Energy Analysis”. INNOVA.2015
- [7] T. Mancini, P. Heller i e. al., «Dish Stirling Systems: an Overview of Development and Status,» *Journal of Solar Energy Engineering*, núm. 125(2), pp. 135-151, 2003
- [8] B. Cullen, J. McGovern, «Development of a Theoretical Decoupled Stirling Cycle Engine,» *Dublin Institute of Technology*, 2009
- [9] A. Egea, A. Junyent i O. Gomis, «Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems,» de *Modeling and Control of Sustainable Power Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 47-81
- [10] «Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT,» *Agencia estatal de metereologia (AEMET)*, pp. 7-28;101
- [11] J. M. Gavilán Conde, «Desarrollo de modelo de comportamiento del sistema disco parabólico Eurodish,» 2011
- [12] F. Lanini, «Division of global radiation into direct radiation and difuse radiation» *University of Bern, Faculty of Science*, 2010
- [13] D. F. Howard, «Modeling, simulation, and analysis of grid connected dish-stirling solar power plants,» 2010.
- [14] «Empirical Model for the Estimation of Global Solar Radiation with sunshinehours on horizontal surface in various cities of Pakistan,» *Pakistan Journal of Meterology*

- [15] «Datos AEMET hasta 2012,» [En línea]. Disponible:
<http://datosclima.es/Aemethistorico/Prestad.php>. [Últim accés: abril 2016].
- [16] «El hombre y la máquina,» *Universidad autónoma de occidente Colombia*, 2014 pp. 64-74
- [17] S. Guevara Vásquez, «Estimación de la radiación solar,» *Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias del medio ambiente*, Lima 2003

A Seguiment solar

Per a els càlculs de la irradiància solar directa, s'han necessitat dades concretes de la posició del sol per fer determinats càlculs. Aquí s'explica el procediment de com obtenir-los.

Realitzar un bon seguiment solar és de vital importància a l'hora de maximitzar la potència generada pel disc Stirling. Per a això s'empren combinacions de GPS i sensors solars. Hi ha dos mètodes principals per orientar el disc cap al Sol:

- Seguiment azimuth – elevació: El disc gira en un pla paral·lel al Terra i en un altre perpendicular a aquest.
- Seguiment polar: El disc gira al voltant d'un eix paral·lel a l'eix de rotació de la Terra al mateix ràtio de rotació que ella. El segon eix, de declinació, és perpendicular a l'eix polar.

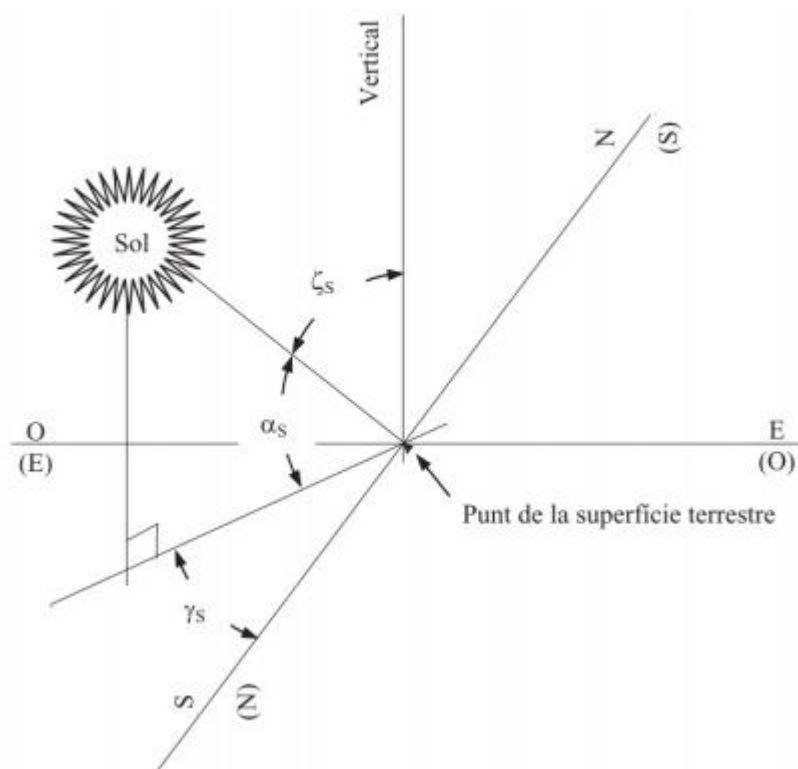


Figura A.1. Angles d'elevació (α_s) i azimuth (γ_s)

En tots dos casos són necessaris dos eixos de rotació per alinear el disc amb el Sol, i és que es pot considerar el Sol com un focus puntual que es mou per la superfície d'una esfera celeste, al centre de la qual es troba el punt d'interès. Així doncs, és comú utilitzar un marc de referència azimuth-elevació, on l'azimut està definit com l'angle format entre la projecció

sobre el pla de la recta que uneix el Sol amb l'origen i la direcció Sud (Nord en certs casos) i l'elevació està definida com l'angle format entre la recta que uneix el Sol origen i el pla horitzontal (Figura A.1.).

Seria possible orientar un disc si es disposa d'aquests dos valors, deduïbles segons la localització del punt d'interès si es defineixen altres dues variables:

- Angle horari ω : Angle format per les projeccions sobre el pla de l'equador, el meridià del punt considerat i de la recta que uneix els centres de la terra i el Sol en aquest instant.
- Declinació solar δ : Angle format entre el raig incident procedent del Sol i el pla de l'equador.

Sabent que la declinació solar es pot calcular mitjançant l'equació de *Cooper* per a un dia n de l'any:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen}\left[360 \frac{284+n}{365}\right] \quad (\text{Ec. A.1})$$

L'angle horari és una mesura que relaciona el temps solar amb la posició de l'estrella en el cel. Així doncs està definit com 0° al migdia solar local i augmenta 15° per hora. Aquest valor és fàcilment demostrable en saber que la Terra completa una rotació sobre el seu eix cada vint-i-quatre hores, de manera que cada hora ha de correspondre a una rotació de $360/24=15^\circ$. D'aquesta manera una fórmula per calcular l'angle horari podria ser:

$$\omega = (\text{Hora solar} - 12) \cdot 15^\circ \quad (\text{Ec. A.2})$$

No obstant això, l'hora solar (H_s) i la local (H_l) no sempre concorden i poden haver discrepàncies, per la qual cosa se li apliquen un seguit de correccions:

on L_{REF} és la longitud del meridià de referència (0°), L_{LOC} la longitud del meridià local ($2^\circ 11' 0''$ a Barcelona), ϵ és una correcció d'horari, de valor -1 per horari d'hivern i -2 per horari d'estiu per a Barcelona i ET es coneix com equació del temps i es calcula segons:

$$ET = 0,0072 \cos C - 0,0528 \cos(2C) - 0,0012 \cos(3C) - 0,1229 \text{sen} C - 0,1565 \text{sen}(2C) - 0,0041 \text{sen}(3C) \quad (\text{Ec. A.3})$$

Quan C , es igual a:

$$C = \frac{2\pi n}{366} \quad (\text{Ec. A.4})$$

I, per últim, n torna a ser el dia de l'any.

L'alçada solar α_s per a un punt situat a una latitud φ per a un dia n i un angle horari ω es pot trobar a la següent expressió:

$$\alpha_s = \arcsen(\sen\delta\sen\varphi + \cos\varphi\cos\omega\cos\delta) \quad (\text{Ec. A.5})$$

I l'angle azimut solar γ s'obté mitjançant:

$$\alpha_s = \arcsen\left(\frac{\cos\delta\sen\omega}{\cos\alpha_s}\right) \quad (\text{Ec. A.6})$$

B Pressupost

En aquest apartat es realitza el pressupost d'aquest projecte. Es valoren els costos de les hores, el programari i els equips utilitzats.

Desglossament d'hores d'enginyeria		
Fase d'execució	Hores(h)	Hores totals(h)
Documentació:		
- Recull d'informació	30	
- Recull de dades	20	
- Avaluació de la simulació	50	
		100
Disseny:		
- Càlculs de dades reals	50	
- Simulacions i representacions de dades	200	
- Implementació a l'Excel i MATLAB	100	
		350
Redacció		110
Total hores		560 h

Taula B.1. Pressupost hores d'enginyeria

Amortització d'actius				
Actiu	Cost inicial	Anys amortització	Amortització anual	Amortització en el projecte
Microsoft Office 2010	100 €	4 anys	25 €/any	25 €
Equips informàtics	750 €	4 anys	178,5 €/any	178,5 €
MATLAB	2000 €	4 anys	500 €/any	500 €

Simulink	3000 €	4 anys	750 €/any	750 €
Total				1453,5 €

Taula B.2. Amortitzacions

Despeses d'enginyeria			
Fase d'execució	Hores (h)	Preu unitari (€)	Total (€)
Documentació	100	35	3500
Disseny	350	35	12.250
Redacció	110	35	3.850
Total			19600 €

Taula B.3. Despeses d'enginyeria

Despeses d'amortització	
Actiu	Amortització (€)
Microsoft Office 2010	25
Equips informàtics	178,5
MATLAB	500
Simulink	750
Total	1453,5 €

Taula B.4. Despeses d'amortització

Despeses diverses	
Tipus de despesa	Cost (€)
Transport	474
Material d'oficina	30
Altres despeses	20

Total	524 €
-------	--------------

Taula B.5. Despeses diverses

Despeses totals	
Tipus de despesa	Cost (€)
Despeses d'enginyeria	19.600
Despeses d'amortització	1453,5
Despeses diverses	524
Total	21.577,5 €

Taula B.6. Despeses totals

Pressupost total	
Despeses totals	21.577,5 €
IVA vigent, 21%	4.531,28 €
Total	26.108,78 €

Taula B.7. Pressupost del projecte

El pressupost total del projecte ascendeix a **26.108,78 €**

C Impacte ambiental

Per analitzar el impacte ambiental del sistema Dish-Stirling estudiat en aquest projecte s'ha fet servir el mètode dels Eco-indicadors'99. El mètode d'estudi amb els indicadors permet simplificar l'anàlisi del cicle de vida a partir de coeficients de ponderació del impacte de cada element o procés i comparar ràpidament la magnitud de la petjada ecològica. En la Figura C.1. es pot veure amb detall el model de dany d'aquest mètode.

La característica principal de l'Eco-indicador 99 es que es tracta d'un mètode d'avaluació de impacte de punt final ("end-point method"). Això vol dir que inclou un model de dany, de manera que les categories d'impacte intermèdies, calculades a partir del inventari i valorades cadascuna en la seva unitat corresponent, s'agrupen en les anomenades categories de dany. A més, en aquesta tècnica, cadascuna d'aquestes categories de dany és adimensionalitzada a una unitat comuna (Punt Eco-indicador), de manera que aquesta adimensionalització permet comparar entre si les categories de dany que depenen de factors molt diversos, i també obtenir una puntuació única per a la valoració final de l'anàlisi de cicle de vida d'un producte. Això es porta a terme en les fases de normalització i ponderació.

El valor d'1 punt Eco-indicador representa 1 centèsima part de la càrrega ambiental anual d'un ciutadà europeu mitjà (nombre calculat dividint la càrrega ambiental total a Europa entre el nombre d'habitants). Es multiplica per 1000 com a factor d'escala.

Les categories d'impacte (avaluació de punt mig) i categories de dany (avaluació de punt final), són les següents:

Categories d'impacte:

- Cancerígens (DALY). Es consideren les substàncies lligades a l'aparició de càncer, basant-se en resultats experimentals i estudis epidemiològics.
- Orgànics respirats (DALY). Efectes respiratoris resultants de l'ozó fotoquímic i emissions de substàncies orgàniques a l'aire.
- Inorgànics respirats (DALY). Efectes respiratoris associats a emissions com ara les partícules, CO, SO₃, O₃, nitrats i sulfats.
- Canvi climàtic (DALY). Es basa en el model de caracterització desenvolupat pel IPPC, i s'expressa com el potencial d'escalfament global amb un horitzó temporal al llarg de 200 anys associat a les emissions. Es consideren gasos amb vida menor de 20 anys, entre 20 i 100 anys i superior a 100 anys.
- Radiació (DALY). Avalua l'alliberament de material radioactiu al medi ambient, i el relaciona amb efectes carcinògens i hereditaris en salut.

- Capa d'ozó (DALY). Es consideren els gasos que contribueixen al seu esgotament, basat en diferents estudis i fonts.
- Eco-toxicitat (PAF-m²yr). Avalua l'emissió de substàncies tòxiques, principalment metalls pesants, sent el crom la substància de referència.
- Acidificació / eutrofització (PDF-m²yr). Dany de la qualitat de l'ecosistema com a resultat de les emissions de substàncies acidificants a l'aire.
- Ús de la terra (PDF- m²yr). Avalua els danys en la diversitat d'espècies associat a l'ús específic o a la conversió de terres.
- Minerals (MJ surplus). Relaciona el descens en la concentració de material amb l'energia necessària per a la seva extracció.
- Combustibles fòssils (MJ surplus). Avalua l'esforç relacionat amb l'extracció d'aquests combustibles en base al consum.

Les unitats de les categories d'impacte estan referides a la categoria de dany en la qual s'engloben. Així, les relacionades amb la salut humana, s'expressen en DALY, que mesura la diferència en salut deguda a morts prematures i de la pèrdua de qualitat de vida en general. Un DALY és igual a un any de vida saludable perdut.

Pel que fa a qualitat del ecosistema, l'eco-toxicitat s'expressa en PAF-m²yr, que mesura la fracció d'espècies afectades quantificant l'efecte tòxic en organismes que viuen en aigua i terra, i la resta de categories d'impacte associades s'expressen en PDF-m²yr, que mesura el percentatge d'espècies desaparegudes a causa de la càrrega mediambiental. S'utilitza un factor de conversió per sumar aquestes categories d'impacte en la categoria de dany corresponent, dividint els resultats de PAF per 10.

Per a les categories de recursos, s'utilitza MJ surplus, que considera els efectes causats per l'extracció de minerals i combustibles fòssils, avaluant l'energia addicional necessària per a l'extracció de minerals i combustibles fòssils de menor grau.

Categories de dany:

- Salut humana (DALY). La salut de l'individu, present o futur, pot ser danyada pel que fa a la seva durada o discapacitat per fonts mediambientals, com ara les malalties infeccioses, cardiovasculars i respiratòries, càncer com a conseqüència de radiació ionitzant, càncer i danys oculars a causa del esgotament de la capa d'ozó, càncer causa de químics tòxics presents en l'aire, aigua o menjar, així com el desplaçament imposat pel canvi climàtic.
- Qualitat de l'ecosistema (PDF-m²yr). S'assumeix que els ecosistemes són molt complexos, sent extremadament difícil determinar tots els danys rebuts. Un indicador és la diversitat d'espècies, mitjançant el percentatge d'espècies que estan amenaçades o que desapareixen d'una àrea determinada durant un cert temps. A

més, es distingeixen els càlculs realitzats pel que fa a eco-toxicitat, acidificació i eutrofització, i ús de la terra.

- **Recursos** (MJ surplus). En el cas de recursos no renovables, s'assumeix que hi ha un límit per a l'explotació, encara que és bastant arbitrari fixar xifres exactes al respecte. Així, el mètode no considera la quantitat de recursos tal qual, sinó l'estructura qualitativa d'aquests recursos, assumint que els recursos futurs seran més difícils d'obtenir en tenir menys concentració del material en qüestió.

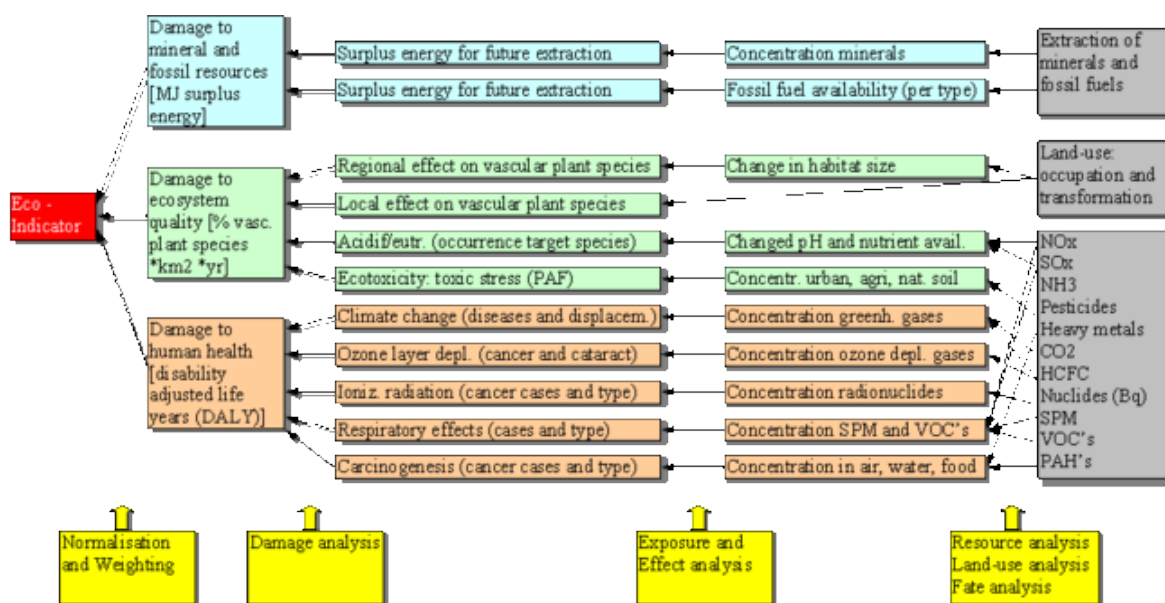


Figura C.1. Representació detallada del model de dany

Els resultats s'expressen per a cada mètode en funció dels indicadors (amb unitats) associats a les categories d'impacte. Aquest es coneix com la caracterització, que unit a l'agrupació de les categories d'impacte amb les seves unitats corresponents permet l'avaluació de danys. De vegades, aquest pas pot ser suficient per a comparacions, quan, per exemple, totes les categories considerades mostren un valor superior per a un producte respecte al comparat. No obstant això, en moltes ocasions interessa realitzar la normalització per tal d'adimensionalitzar les categories i poder establir comparatives entre elles, així com relativitzar la seva importància. Així, pot realitzar-se el pas de la normalització, amb la finalitat de tenir un valor relatiu de manera que permet avaluar la magnitud i importància dels diferents efectes associats a les categories de forma conjunta. En el cas de l'Eco-indicador 99 es realitza la normalització en base a les categories d'impacte i de dany (unitat coneguda com a punt Eco-indicador). És amb aquest indicador amb el qual es pretén fer l'anàlisi del impacte ambiental d'aquest projecte.

S'ha aplicat la metodologia en els components més significatius, a nivell de materials, fabricació, utilització i reciclatge, considerant una vida útil del sistema de 30 anys. A continuació es defineixen els diferents materials i els processos de fabricació de les parts principals del model:

- Absorbidor: 12 kg d'aliatge de níquel, amb processos de treball en fred, fosa, soldadura elèctrica lineal i procés de soldadura en forn.
- Cilindre / pistó d'expansió: 150 kg d'acer, amb processos de producció de treball en fred, forja i mecanitzat.
- Elements de connexió del motor: 40 kg d'acer, procés de producció: treball en fred.
- Generador elèctric: 20 kg d'acer i 20 kg de coure, amb processos de producció de treball en fred i fosa.
- Regenerador: 15 kg d'acer, procés de producció: treball en fred.
- Concentrador: onze peces de miralls d'alumini de 10 kg cadascuna.
- Estructura metàl·lica: 500 kg d'acer inoxidable i acer galvanitzat, procés de producció: treball en fred.
- Bancada de formigó: 3520 kg de formigó (ciments de 2m×2m×0,4m).

Es considera, també, el transport de tots els materials des de Itàlia fins a Barcelona (uns 700 kg en, aproximadament, uns 1800 km). A la Taula C.1. es poden veure els diferents eco-indicadors de producció.

PRODUCCIÓ

Material / procés	Quantitat	Unitats	Indicador [punts/u.]	Punts Eco-indicador
Aliatge de Níquel	12	kg	5200	62400
Acer	225	kg	86	19350
Coure	20	kg	1400	28000
Alumini	110	kg	780	85800
Acer inox./galvanitzat	500	kg	910	455000
Formigó (2200 kg/m ³)	3520	kg	3,8	13376
Extrusió	200	kg	72	14400
Laminat	110	kg	30	3300

Premat	180	kg	23	4140
Camión	1260	t·km	22	27720
TOTAL				713.486

Taula C.1. Eco-indicadors de la producció

El major impacte el provoca l'estructura d'acer inoxidable, seguida de les plaques d'alumini i l'aliatge de níquel que forma part de l'absorbidor. Un canvi de material o dels paràmetres en l'estructura principal, sempre dintre dels marges de seguretat, podria disminuir considerablement el impacte.

A continuació, es valora el impacte que té el Dish-Stirling degut al seu us. Es considera el consum de l'aigua i de l'anticongelant (que és aigua amb propilenglicol). Pel que fa a la producció anual de potència, s'ha considerat una mitjana de la potència obtinguda amb les dades reals (pot ser una dada molt diferent a la realitat ja que només es tenen dades de dos mesos de l'any) i la màquina treballant un 50% dels dies de l'any. Pel que fa altres consums com són el bombeig, control i reescalfament d'aigua pel gimnàs, es considera un 10% de la producció elèctrica del sistema. Els eco-indicadors d'això es poden veure a la Taula C.2.

UTILITZACIÓ DISH-STIRLING

Material / procés	Quantitat	Unitats	Indicador [punts/u.]	Punts Eco-indicador
Aigua	400	l	0,03	12
Propilenglicol	50	l	200	10000
Energia Elèctrica	12267	kWh	-26	-318942
Energia Tèrmica	34779	kWh	-7,2	-250409
Energia Elèctrica Consumida	1227	kWh	26	31902
TOTAL SENSE FUNCIONAMENT				41.914
TOTAL AMB FUNCIONAMENT				- 527.437

Taula C.2. Eco-indicadors per la utilització

Com s'observa el impacte degut a la utilització del model és molt menor a la deguda a la producció. Pel que fa al funcionament de la màquina Dish-Stirling, s'observa com els indicadors són molt favorables quan es genera electricitat gràcies als raigs solars.

Per últim, es fa un estudi també del reciclatge d'algun dels materials que formen part de l'estructura com són l'acer i l'alumini. A la Taula C.3. es poden veure els corresponents eco-indicadors.

RECICLATGE				
Material / procés	Quantitat	Unitats	Indicador [punts/u.]	Punts Eco-indicador
Reciclatge d'alumini	110	kg	-720	-79200
Reciclatge de l'acer	225	kg	-70	-15750
TOTAL				-94.950

Taula C.3. Eco-indicadors de reciclatge

A la Taula C.4. es veuen els eco-indicadors tenint en compte tots el processos i diferenciant quan hi ha funcionament i quan no hi ha.

Fase	Sense funcionament	Amb funcionament
Producció	713.486	713.486
Utilització	41.914	- 527.437
Reciclatge	-94.950	-94.950
TOTAL	660.450	91.099

Taula C.4. Eco-indicadors de totes les fases

Si el sistema Dish-Stirling funcionés més sovint i amb uns rendiments millors, es podrien millorar encara més els eco-indicadors pel que fa quan el sistema està en funcionament. Sense el sistema en funcionament ja es veu que la producció del sistema genera uns eco-indicadors que no son gaire favorables.